

# 2

## Biomonitoreo de contaminante el uso de briofitas como muestreadores biológicos para el aire de la ciudad de Quito

Paco Noriega<sup>1</sup>, Alessandro Medici<sup>2</sup>, Antón Murillo<sup>3</sup>, Julio Puente<sup>3</sup>,  
Juan Bedón<sup>3</sup>, Galo Galecio<sup>3</sup>, Fernando Haro<sup>3</sup>

### 1. Introducción

El aire es sin lugar a dudas el elemento más importante para los seres vivos. Un aire contaminado nos afecta de distintas maneras: produce y acelera enfermedades respiratorias, nos intoxica arrastrando hacia nosotros elementos y compuestos peligrosos; y por ende disminuye nuestra esperanza de tener una vida saludable.

La ciudad de Quito ha pasado de ser una ciudad de algunos cientos de miles de personas a albergar casi a dos millones de habitantes, incluyendo a las ciudades satélites que prácticamente se han unido a la urbe. Este intenso crecimiento demográfico trajo consigo los problemas ambientales que toda gran metrópoli enfrenta: crecimiento industrial, incremento de desechos y aumento del parque automotor, todos éstos en mayor o menor grado causantes del deterioro del aire.

---

1 Director del Proyecto de investigación, Decano de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales de la Universidad Politécnica Salesiana.

2 Colaborador Externo: Profesor Universidad de Ferrara-Italia.

3 Estudiantes de la Carrera de Biotecnología de la Universidad Politécnica Salesiana.

La atmósfera es una capa protectora que hace posible la vida en la tierra y la protege del ambiente hostil del espacio exterior. Es fuente de dióxido de carbono para la fotosíntesis de las plantas y de oxígeno para la respiración. Proporciona nitrógeno que las bacterias fijadoras de nitrógeno y las plantas productoras de amoníaco para producir el nitrógeno enlazado químicamente, que es un componente esencial de las moléculas de los seres vivos. Desgraciadamente con el desarrollo industrial humano, la atmósfera es también el sitio de destino de muchos materiales contaminantes.

## Los Contaminantes Analizados

### 1.1 Los metales pesados el plomo y el cadmio

En los años veinte del siglo pasado se descubrió que la adición a la gasolina de compuestos organometálicos de plomo, especialmente, tetraetil o tetrametilplomo, disminuyen la detonación. En los años posteriores, el plomo se incorporó prácticamente a todas las gasolinas con el objeto de mejorar sus características. Los aditivos de plomo suprimen las reacciones radicáticas encadenadas que se producen en la fase de preignición. A medida que la mezcla aire-combustible se comprime y calienta, se produce la ruptura de los débiles enlaces alquil-plomo y la eliminación de los átomos de plomo, los cuales se combinan posteriormente con el oxígeno para formar partículas de  $PbO$  y  $PbO_2$ . Estas partículas proporcionan sitios de unión a los radicales hidr carbonatos, poniendo término a la cadena de reacciones. Para eliminar la acumulación de depósitos de plomo en el interior de la superficie del motor, las gasolinas con plomo también contienen dicloroetileno o dibromoetileno. Estos compuestos organohalogenados actúan como limpiadores de plomo, originando  $PbX_2$  (donde  $X = Cl$  o  $Br$ ). Debido a que estos compuestos son volátiles a las elevadas temperaturas de escape, eliminan el plomo del interior del motor liberándolo a la atmósfera.

A mediados de los años setenta se empieza a comercializar en Estados Unidos la gasolina sin plomo, desplazando gradualmente a la gasolina con plomo, en Ecuador este cambio es reciente. La razón se debe a que los compuestos de plomo de los gases de escape reaccionan con los catalizadores de platino y rodio de los convertidores catalíticos, envenenando su superficie e inactivándolos. El incremento de la flota de automóviles con catalizador, aumentó el consumo de la gasolina sin plomo. Esta sustitución ha tenido un efecto favorable sobre la contaminación del plomo, y en general sobre la contaminación atmosférica. La exposición humana disminuyó significativamente cuando el plomo fue eliminado.

Sin embargo, la peligrosidad del plomo radica en tener efectos neurotóxicos, daña los riñones y el aparato reproductor. Aun la exposición de baja intensidad afecta el desarrollo mental infantil disminuyendo la capacidad de aprendizaje y concentración.

Por otro lado, el cadmio, se encuentra en el mismo subgrupo de la tabla periódica que el zinc y el mercurio, pero es más similar al primero. Su única especie es la de valencia 2+, como en el caso de otros metales pesados, la quema de carbón introduce cadmio al medio ambiente. El tratamiento por incineración de residuos que contienen cadmio es también una fuente importante del metal en el medio ambiente.

Una aplicación importante del cadmio es como electrodo en baterías recargables de níquel-cadmio, utilizadas en calculadoras y en aparatos similares. Con el fin de no emitir partículas de cadmio al medio ambiente después de la combustión, algunos municipios obligan a separar las baterías de níquel-cadmio del resto de la basura.

En forma iónica, el principal uso del cadmio es como pigmento, ampliamente ha sido utilizado para pigmentar plásticos, también han sido empleados sales de azufre y selenio CdS y CdSe; además el CdSe se usa también en dispositivos fotovoltaicos (como las células fotoeléctricas) y en pantallas de televisión.

El cadmio es una sustancia cancerígena, su exposición prolongada daña los riñones y los huesos.

Tanto el Cd como el Pb, son componentes de la denominada basura electrónica; es decir, la proveniente de televisores, computadoras, celulares y demás dispositivos electrónicos.

## 1.2 Los BTX

Los BTX (benceno, tolueno y xileno), son componentes comunes de las gasolinas, también se los consideran parte de esta familia a compuestos como el cloro y el dicloro benceno, y el dietilbenceno. Los BTX, han sido añadidos en los últimos años a las gasolinas para reemplazar el uso de compuestos con plomo, y de esta manera reducir el poder detonante de las gasolinas, esto ha traído como resultado un incremento de BTX en el aire exterior.

El benceno inhalado es absorbido rápidamente por la sangre, y es tomado fuertemente por los tejidos grasos. Para el compuesto no metabolizado, el proceso es reversible y el benceno se excreta a través de los pulmones. Lo metabolizado se transforma en fenol en el hígado, por medio de una reacción de oxidación. El intermediario epóxido del benceno, reactivo y de corta vida, que se sabe participa en esta reacción es, probablemente, responsable de gran parte de la toxicidad del benceno que incluye el daño a la médula ósea. Además del fenol, se producen otros derivados oxigenados del benceno cuando éste se metaboliza, como ácido trans, trans-mucónico, producido por la ruptura del anillo bencénico.

El benceno es un irritante de la piel y exposiciones progresivamente más altas pueden causar enrojecimiento de la piel (eritema), sensación de quemaduras, acumulación de fluidos (edema) y ampollas. La inhalación, durante una hora, de aire que contiene  $7\text{g/m}^3$  de benceno causa envenenamiento agudo, debido a un efecto narcótico sobre el sistema nervioso central que se manifiesta progresivamente por la excitación, depresión, fallos en el sistema respiratorio y la muerte. La inhalación de aire que contenga

más de, aproximadamente, 60 g/m<sup>3</sup> de benceno, puede ser fatal en unos minutos.

Causan preocupación debido a su capacidad carcinógena, en especial el benceno al cual se lo ha relacionado con la aparición de la leucemia. Las exposiciones a largo plazo a bajos niveles de benceno causan síntomas no específicos, que incluyen fatiga, dolor de cabeza y pérdida del apetito.

El tolueno, un líquido incoloro que hierve a 101°C, es clasificado como ligeramente tóxico por inhalación o ingestión; tiene una toxicidad baja por exposición dérmica. Debido a que posee una cadena alifática CH<sub>3</sub> que puede oxidarse enzimáticamente a productos que se excretan prontamente del cuerpo, el tolueno es mucho menos tóxico que el benceno.

### **1.3 Los hidrocarburos policíclicos aromáticos PAHs**

Se trata de hidrocarburos análogos al benceno que contiene varios anillos de seis miembros conectados entre ellos por medio de la compartición de un par de átomos de carbono adyacentes, lo cual da lugar a anillos fusionados. El ejemplo más simple es el naftaleno C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>. Otros miembros de esta familia son el antraceno, fenantreno o el pireno. Los PAHs se introducen en el medio ambiente a partir de varias fuentes: los gases de escape de los motores de combustión de gasolina y, especialmente, del diesel, el alquitran de los cigarrillos, la superficie de los alimentos carbonizados o quemados, el humo de la combustión de la madera o del carbón, así como otros procesos de combustión en los que el carbono del combustible no sea convertido completamente a CO o CO<sub>2</sub>. Aunque constituyen sólo un 0,1% de las partículas atmosféricas, preocupa su existencia como contaminante del aire, ya que muchos PAHs son cancerígenos, al menos en ensayos con animales.

### **1.4 El biomonitoreo por briofitas**

Esta técnica se basa en el principio de que una sustancia tóxica que es perjudicial a los organismos vivos, así por medio de estos logramos

determinar la concentración de contaminantes tanto en el organismo como en el medio en el que se desenvuelven.

Las técnicas del biomonitoreo de un producto biológico, como son las briofitas en este caso, se dan analizando la variación de la morfología, fisiología y genética de los organismos, midiendo las concentraciones de sustancias en los organismos.

El biomonitoreo representa un campo independiente de la búsqueda de contaminantes en el campo biológico y puede convertirse en una ayuda válida para alcanzar un propósito común representado por la mejora de la calidad del aire que respiramos.

El biomonitoreo no es costoso y permite confiabilidad en la medición de la contaminación atmosférica.

En lo que se refiere a las briofitas, con cerca de 20.000 especies, las briofitas son el segundo grupo más importante de plantas verdes. Comúnmente conocidos como musgos son plantas muy simples, sin vasos conductores, ni flores, ni frutos, que viven en lugares húmedos y sombríos, aunque resisten períodos de sequía. Los musgos inhiben la erosión del suelo y promueven la retención de la humedad del mismo, son plantas de amplia distribución mundial, usualmente viven en lugares húmedos o cerca del agua.

Se encuentran entre los primeros organismos que colonizan las rocas, pues al crecer sobre ellas modifican su superficie, formando un sustrato en el que se pueden arraigar otras plantas. Es frecuente encontrarlos a manera de alfombras en el piso de los bosques húmedos, aunque también crecen sobre las ramas y los troncos de árboles, en techos de edificaciones, en muros de concreto y hasta sobre las alcantarillas.

Las briofitas poseen varias ventajas sobre otros grupos de especies: reaccionan rápidamente a cambios en la estructura del aire, muchas especies están restringidas a ciertas condiciones microclimáticas y poseen áreas de distribución geográfica muy amplias. Desde el punto de vista taxonó-

mico, las briofitas se conocen relativamente bien y se puede decir que su único alimento es el agua líquida.

Así, las briofitas son muy adecuadas como indicadoras en amplias regiones de los bosques neotropicales y ciudades, mientras que la mayoría de las plantas vasculares sólo son indicadoras locales. La desventaja de utilizar briofitas es su pequeño tamaño y el hecho de que pocos especialistas en el estudio de este grupo viven en América del Sur.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Recolección del musgo**

Para la recolección de los biomonitores se usó musgo del refugio de vida silvestre Molinuco, ubicado al Sur Oriente de la ciudad de Quito, a 45 minutos en auto desde la población de Sangolquí.

Las muestras fueron recogidas integra llevando consigo la corteza o tronco que las acogían. (Figuras 1 y 2).



Figura 1. Recolección de las briofitas (musgo)



Figura 2. Muestras de briofitas recolectadas íntegramente con la corteza que las acogía.

## 2.2 Ubicación de los Bio monitores

Para ubicar a los musgos se escogieron 20 puntos a lo largo y ancho de la ciudad de Quito y comunidades aledañas. Fueron depositados en parques y avenidas, sembradas en árboles, manteniendo la corteza original que los mantenía, asegurando las muestras con la ayuda de cinta adhesiva. (Figuras 3 y 4).

Los puntos seleccionados se presentan en la siguiente tabla (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación exacta de los veinte biomuestreadores por sector

Punto No.	UBICACIÓN	SECTOR
1	Av. General Enriquez	Sangolquí
Sur de Quito		
2	Yumanay Ñan y Av. Maldonado	Guamaní
3	Ajaví y Cardenal de la Torre	Parque Lineal
4	Av. Rumichaca y Av. Morán Valverde	UPS-Sur
5	Quitús y Jacinto Collaguazo	La Magdalena
Norte y Centro de Quito		
6	Av. 10 de Agosto y Gran Colombia	Parque la Alameda
7	Santa Lucía e Isabel la Católica	UPS-Girón
8	Enrique Rither y Av. la Gasca	La Gasca
9	Av. Mariana de Jesús	Parque de la Mujer
10	Japón y Av. Naciones Unidas	Parque la Carolina
11	Av. Francisco Urrutia y Av. Eloy Alfaro	parque Chile
12	Av. Eloy Alfaro	Partidero a Zámbriza
13	Av. Charles Darwin	Quito Tennis
14	Av. 10 de Agosto y Cap. Ramón Borja	La Luz
15	Machala	Parque Inglés
16	Luis Guerrero	Cotocollao
17	Arupos y Tulipanes	Ponciano Bajo
18	Av. Alonso Vaca y Diego Parra	Carcelén
19	Carapungo	Carapungo
20	Calderón	Calderón



Figura 3. Colocación de los Bio monitores en parques y avenidas de Quito



Figura 4. Colocación de los Bio monitores en parques y avenidas de Quito

Los monitores biológicos pasivos permanecieron en sus puntos durante 50 días, equivalentes al 14% de un año.

## **2.3 Tratamiento de las muestras**

Transcurrido el tiempo previsto (50 días), se procedió a la recolección de las muestras de los sitios respectivos y fueron trasladados de inmediato a los laboratorios del CIVABI.

Las muestras fueron secadas al ambiente, por varios días y, posteriormente, molidas finamente para el análisis.

### **2.3.1 Análisis de metales pesados plomo y cadmio**

Se pesaron exactamente con la ayuda de una balanza analítica alrededor de 0,5 g de muestra, la cual fue digerida con 5 ml de una mezcla de 8 partes de HNO<sub>3</sub> y 2 partes de HCl, a reflujo por 2 horas.

Se filtro el residuo y se aforó a 25ml con agua destilada.

Independientemente, se trabajó con un blanco que contenía musgo virgen que no había sido sometido a la contaminación del ambiente para encerrar el equipo de absorción atómica. Para el análisis se comparó la concentración de los musgos con una serie de estándares de concentraciones de Cd y Pb.

Para el ensayo se empleó un equipo de absorción marca Varian, modelo 4200, y un detector de masas Varian, modelo Saturn 2001.

### **2.3.2 Análisis de los BTX**

Para este análisis se pesaron exactamente con la ayuda de una balanza analítica alrededor de 0,25 g de musgo de muestra.

Como solvente se utilizó metanol calidad HPLC, en contacto con el musgo por 30 minutos y ultrasonido, finalmente se llevó a un volumen de 3ml con metanol.

La solución de 0,2 ppm se preparó usando un estándar certificado de BTX, (ACCUSTANDAR, 2005), de concentración 100 ppm.

Para extraer los analitos se usó el método de espacio de cabeza, combinado con microextracción en fase sólida, empleando una fibra SPME polidimetilsiloxano.

Para el estándar se tomaron 1ml del preparado de 0,2ppm + 1ml de agua en un vial cerrado. Se introdujo la fibra en el espacio de cabeza por 20 minutos a 85 ° C, luego se colocó por 2 minutos en el inyector a 180 ° C, para que se produzca el desorbimiento y se inyectó.

De igual manera se tomaron 1ml de cada una de las muestras se introdujo en el vial + 1ml de agua destilada, y se repitió el procedimiento anteriormente descrito.

En cuanto a las condiciones del cromatógrafo se trabajó con una temperatura del inyector de 180°C, un flujo en columna de 1,0 ml/min, gas helio de pureza 99,9999%, con un split off.

La rampa de la columna parte de una temperatura de 40°C, que se mantuvo estable por un minuto, incrementándose la temperatura a razón de ocho grados centígrados por minuto, hasta alcanzar los 160°C, finalmente se mantuvo a esta temperatura por dos minutos, el tiempo total de análisis fue de dieciocho minutos.

Para el análisis se utilizó un equipo de cromatografía gaseosa marca Varian, modelo 4200, y un detector de masas Varian, modelo Saturn 2001.

### **2.3.3 Analisis de PHAs**

Para este análisis se usó un estándar (ACCUSTANDAR, 2005) para PHAs de 20 ppm, de estos se prepararon estándares de 0,2 ppm diluyendo con acetonitrilo calidad HPLC.

La muestra se preparó pesando aproximadamente 0,25g de musgo, macerándolo por una noche en acetonitrilo + 30 minutos de extracción en

ultrasonido, finalmente se filtró y aforó hasta alcanzar un volumen de 3ml en viales cerrados.

Se inyectaron tanto de muestra como de estándar 4 ml.

El cromatógrafo presentó una temperatura del inyector de 260°C, con un flujo en columna de 1,0 ml/min con gas helio de pureza 99,9999% y un split On 10.

En cuanto a la rampa de la columna, se inició con una temperatura de 60°C, la cual se mantuvo estable por un minuto, incrementando la temperatura a razón de veinte grados centígrados por minuto, hasta alcanzar los 90°C, se sostuvo esta temperatura por un minuto más y nuevamente se incrementó la temperatura a razón de 10 °C por minuto hasta alcanzar los 180°C, esta temperatura se mantuvo en la columna por cuatro minutos. Una vez más se aumentó la temperatura a una velocidad de 10 °C por minuto, hasta alcanzar los 280°C, finalmente se mantiene a esta temperatura por tres minutos. El tiempo total de análisis es de veinte y nueve minutos y medio.

Para el análisis se utilizó un equipo de cromatografía gaseosa marca Varian, modelo 4200, y un detector de masas Varian, modelo Saturn 2001.

Para obtener resultados en función de la deposición en la atmósfera utilizamos la siguiente expresión.

$$\log_{10}(\text{concentración en el musgo}) = 0,59 + 1,0 \log_{10}(\text{deposición atmosférica})$$

Donde la concentración en el musgo se presenta en *ppm* y la deposición atmosférica en  $\text{mg/m}^3$ .

### 3. Resultados

#### 3.1 Análisis de Metales Pesados

Del análisis realizado se obtuvieron los siguientes resultados en los veinte sitios elegidos para depositar los bio-indicadores, los cuales se detallan a continuación. (Tabla 2) y (Figura 5).

Tabla 2. Concentraciones de Plomo [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] y Cadmio [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] en los veinte sectores muestreados

No.	Sector de la ciudad	Concentración de Plomo en $\text{mg}/\text{m}^3$ producto de 50 días.	Concentración de Cadmio en $\text{mg}/\text{m}^3$ producto de 50 días.
1	Sangolquí	1,61	0
2	Guamani	1,89	0
3	<b>Parque Lineal</b>	<b>3,06</b>	<b>0</b>
4	Chillogallo (UPS Sur)	1,32	0
5	Magdalena	1,61	0
6	Alameda	0,73	0
7	El Girón (UPS Girón)	1,61	0
8	La Gasca	2,48	0
9	Mariana de Jesús	1,61	0
10	La Carolina	1,61	0
11	Parque Chile	1,31	0
12	<b>Zambiza</b>	<b>3,86</b>	<b>0,033</b>
13	Quito Tennis	0,44	0
14	La luz	1,32	0
15	Parque Inglés	0,73	0
16	Cotocollao	2,18	0
17	Ponciano	1,32	0
18	Carcelen	0,73	0
19	Carapungo	1,31	0
20	Calderón	1,02	0

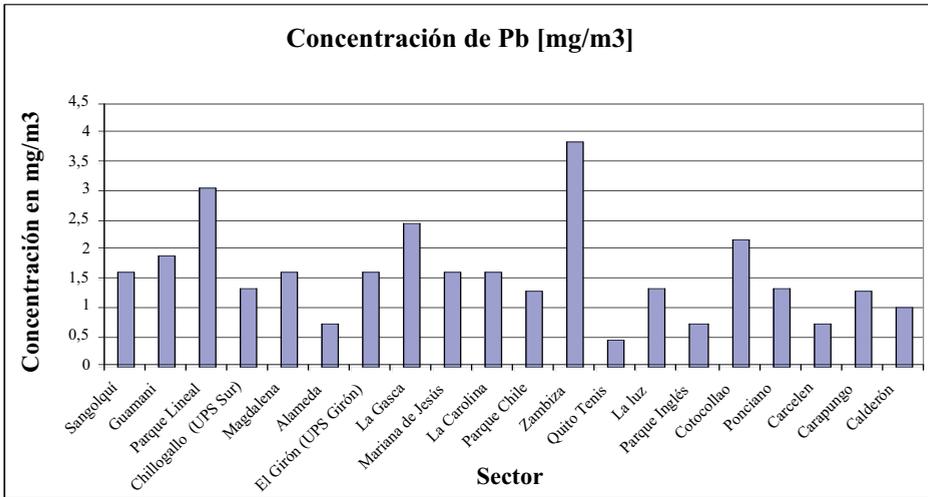


Figura 5. Gráfico comparativo de las diferentes concentraciones obtenidas de plomo en los veinte sectores muestreados.

### 3.2 Análisis de los BTX

El análisis arrojó resultados de concentraciones en tolueno, etilbenceno, o-xileno, p-xileno, diclorobenceno en los veinte sitios elegidos para depositar los bio-indicadores, los cuales se detallan a continuación. (Ver Tabla 3).

### 3.3 Análisis de los PHAs

Para el análisis de los PHAs se obtuvieron concentraciones de naftaleno, acetanaftaleno, acetanafteno, fluoreno, antraceno, fenantreno, fluorantreno y pireno. El análisis arrojó resultados en los veinte sitios elegidos para depositar los bio-indicadores, los cuales se detallan en la siguiente tabla (Ver Tabla 4).

## 4. Discusión

Se puede apreciar que a pesar del poco tiempo de muestreo los resultados son bastante exactos. Es importante continuar la labor del monito-

reo con una siguiente de remediación de la calidad del aire en Quito, sobre todo con los compuestos más peligrosos como el plomo, cadmio y los PHAs que aparecen en importantes concentraciones en sitios muy habitados de la ciudad y que por, sus propiedades cancerígenas y neurotóxicas deterioran la calidad de vida de nuestra comunidad.

## **Bibliografía**

ACCUSTANDAR

2005 *Catálogo de estándares científicos, DIN38407-9-BENZ.*

ACCUSTANDAR

2005 *Catálogo de estándares científicos para PHAs, DIN38407-9-BENZ.*

Tabla 3. Resultados del análisis de BTX en los veinte sectores de la ciudad

Sector de la ciudad	Concentración de Tolueno en mg/m_ producto de 50 días.	Concentración de Etilbenceno en mg/m_ producto de 50 días.	Concentración de o-xileno en mg/m_ producto de 50 días.	Concentración de p-xileno en ug/m_ producto de 50 días.	Concentración de diclorobenceno en ug/m_ producto de 50 días.
Sangolquí	0,1898	0	0	0	0
Guamani	0,163629638	0	0	0	0
Parque Lineal	0,191123847	0	0	0	0
Chillogallo (UPS Sur)	0	0	0	0	0
Magdalena	0	0	0	0	0
Alameda	0	0	0	0	0,09243
El Girón (UPS Girón)	0	0	0	0	0,12368
La Gasca	0	0	0	0	0,2716
Mariana de Jesús	0	0	0	0	0,26047
La Carolina	0	0	0	0	0
Parque Chile	0,132986057	0	0	0	0,02748
Zambiza	0,191163718	0	0	0	0,02597
Quito Tenis	0,143705122	0	0	0	0,107529
La luz	0	0	0	0	0
Parque Inglés	0	0	0	0	0
Cotocollao	0	0	0	0	0
Ponciano	0,159873175	0	0	0	0,07516
Carcelen	0	0	0	0	0
Carapungo	0	0	0	0	0
Calderón	0	0	0	0	0

Tabla 4. Resultados de concentraciones de PHAs en los veinte sitios muestreados.

Sector de la ciudad	Concentración de Nafaleno en ug/m_ producto de 50 días.	Concentración de Acetaminofaleno en ug/m_ producto de 50 días.	Concentración de Acetaminofeno en ug/m_ producto de 50 días.	Concentración de fluoreno en ug/m_ producto de 50 días.	Concentración de antraceno en ug/m_ producto de 50 días.	Concentración de fenantreno en ug/m_ producto de 50 días.	Concentración de pireno en ug/m_ producto de 50 días.
Sangolquí	0	51,37	53,62	0	0	0	8,88
Guamani	0	0	0	0	0	0	8,38
Parque Lineal	0,2806	0	3,85	0	0	0	3,59
Chillogallo (UPS Sur)	9,5316	17,59	22,68	0	0	0	5,99
Magdalena	0	8,98	28,37	6,54	0	0	21,57
Alameda	0	0	0	0	0	0	16,7
El Girón (UPS Girón)	5,908	74,18	0	0	0	0	16,91
La Gasca	0	0	176,12	0	0	0	27,28
Mariana de Jesús	0	0	0	0	0	0	0
La Carolina	0	0	0	0	0	0	0
Parque Chile	3,3355	4,01	8,49	8,84	1,97	0	9,88
Zambiza	2,2736	0	5,79	3,79	0	0	6,76
Quito Tenis	6,4663	0	0	73,4	14,29	0	10,98
La luz	2,9481	6,69	20,89	0	0	0	18,88
Parque Inglés	0	0	0	24,74	0	0	18,81
Cotocollao	2,1928	0	0	0	0	0	8,32
Ponciano	0	20,49	6,47	0	3,45	0	18,99
Carcelen	0	4,05	7,89	5,25	0	0	23,95
Carapungo	0	0	6,33	5,62	4,69	0	13,69
Calderón	2,0848	0	6,07	0	2,46	0	26,67

## Estudio de la actividad biológica de las siguientes plantas por estudiantes

Se presenta en la siguiente tabla los nombres de los estudiantes de la Carrera de Tecnología de los Recursos Amazónicos involucrados y las plantas estudiadas.

Apellidos y nombres de los investigadores	Nombre común de la planta colectada	Nombre científico de la planta colectada
Ankuash Tsamaraint Edwin Floresmiló	Ayaguasca	<i>Banisteriopsis capii</i>
Antún Naichap Jankichak Marianela	Yutsu	<i>Calliandra angustifolia</i>
Ávila Ordoñez Eduardo	Rolaquimba	<i>Carica microcarpa</i>
Cárdenas Rodríguez Nelly Silvana	Ajo de monte	<i>Mansoa alliasa</i>
Chacón Arichabala Jhonatan Jaime	Nacedero	<i>Croton sp.</i>
Jimpikit Kuja Diego	Matico	<i>Piper sp.</i>
Juanga Tangamashi Charim Wenchatei	Santonina	<i>Spigela mulhispica stend</i>
Kawarim Ujukam Timias Antonio	Curarina	<i>Adenostemmal fosbergii</i>
Manchu Jeencham Tserem Hernán	Capulí de monte	<i>Psaida mida</i>
Martinez Yuma César Augusto	Floripondio	<i>Datura sanguinea</i>
Matute Jaramillo Lizeth Patricia	Ubre de vaca	<i>Solanum mammosum</i>
Mayacu Tivi Alexander Lee	Ibila(Sekemur)	<i>Entada polystachya L</i>
Naikiai Mashutak Tsentsak Joselito	Coca	<i>Erytroxilum coca lam.</i>
Ojeda Aguananchi Ninfa Balvina	Uña de gato	<i>Uncaria tomatosa</i>
Pininkias Kashijint Wanset Federico	Tabaco	<i>Nicotina tabacum</i>
Salinas Rodriguez Julia Targelia	Ataco	<i>Amaranthus retroflexus</i>
Sando Mashu Marcelo	Suwa	<i>Genipa americana</i>
Sandu Mashu Kajeche	Huevo de burro( Apai)	<i>Grias peruviana</i>
Shakay Cacepa Dennis Omar	Bala de cañon	<i>Couroupita guianensis</i>
Sharupì Washicta Milton Jimpikit	Kunapip	<i>Tabernaemontana Sananho</i>
Tandu Shacay Jacob Alonso	Piripi	<i>Cyperus prolixus</i>
Tirado Valladares Blanca Germania	Guaviduca	<i>Piper pallidirameum</i>
Tivi Serembo Boris Holger	Takup	<i>Solanum guianensis</i>
Tsenkush Juwa Kashijint Rubén	Yaii	<i>Banisteriopsis Sp.</i>
Ujukam NawecheTsawant Milton	Kuishop	<i>Jacaranda copaia</i>
Utitiaj Wasump Shakaim Celestino	Dormilona	<i>Mimosa dyprodactita</i>
Utitiaja Chau Ramón Edwin	Mortño (Shimpishpi)	<i>Solanum americanum Mill</i>
Vásconez Vargas Jairo Daniel	Dulcamara	<i>Solanum dulcamara</i>
Wajarai Shacay Benito Rodolfo	Chiaak	<i>renealmia sp.</i>
Wamputsrik Unkuch Vicente Hidalgo	Peregrina	<i>Hibiscus sp</i>
Washicta Tzaquimbo Wilmer Jimpikit	Apach	<i>Himatanthus sp.</i>
Yampia Rusi Saant Alvino	Caña agria	<i>Costus amazonicus</i>
Pablo Coba Santamaria	Yumpink	
Pablo Coba Santamaria	Anenkrat	
Pablo Coba Santamaria	Canelo Blanco	<i>Nectandra sp.</i>
Pablo Coba Santamaria	Insulina	<i>carica sp.</i>

## Realización de un primer inventario de flora de 4 zonas de la provincia de Morona Santiago

En la tabla se muestra la localidad donde fue recolectada la muestra y la fecha de recolección.

LOCALIDAD	Fecha
Granja del Instituto Salesiano	04-nov-06
Alrededores de la ciudad de Macas	05/11/2006
Caminos junto al río Macuma	19/01/2006
Bosque Protector del CREA	05/11/2006
Vía Macas- Proaño- San Isidro	29/01/2007
Río Jurumbaino - Cumbre Cerro Quilamo	30/01/2007
Watsak-Entsa	19/05/2007
Orillas del río Upano	30/05/2007
Centro shuar Wisui	19/06/2007
Centro shuar Wisui; Cerro Wisui	24/06/2007
San Luis de Ininkis	29/06/2007
Granja del Instituto Salesiano	29/07/2007

## Tamizaje Fitoquímico

Se realiza el Tamizaje Fitoquímico sobre las siguientes plantas:

Planta analizada	Nombre común
<i>(Adenostemmol forbergii)</i>	CURARINA
<i>(Amaranthus caudatus L.)</i>	ATACO
<i>(Banisteriopsis sp.)</i>	YAJI
<i>(Brugmansia sanguina)</i>	FLORIPONDIO
<i>(Calliandra angustifolia)</i>	YUTSU
<i>(Carica microcarpa)</i>	ROLAQUIMBA
<i>(Chouropita guianensis)</i>	BALA DE CAÑÓN
<i>(Costus amazonicus)</i>	CAÑA AGRIA
<i>(Croton spp.)</i>	MORADILLA
<i>(Dichorisandra bonitana Philipson)</i>	UCHICH UNTUNTUP
<i>(Dioscorea trifida)</i>	TUYO
<i>(Entada polystachya)</i>	SEKEMUAR
<i>(Erythroxilum coca/ fithroxilum)</i>	COCA
<i>(Genipa americana)</i>	SUA
<i>(Grias peruviana)</i>	HUEVO DE BURRO
<i>(Hibiscus sp.)</i>	PEREGRINA
<i>(Himathantus sp.)</i>	UÑA DE GATO

Planta analizada	Nombre común
<i>(Jacaranda copaia)</i>	JACARANDA
<i>(Mansoa alliacea)</i>	AJO DE MONTE
<i>(Mimosa polydactyla)</i>	DORMILONA
<i>(Nicotiana Tabacum)</i>	TSANK
<i>(Phytolacca sanguinea H. Walter)</i>	WAMPAKAR
<i>(Piper agostifoliumm)</i>	MATICO
<i>(Piper pallidirum)</i>	GUAVIDUCA
<i>(Psaida mida)</i>	CAPULÍ DEL MONTE
<i>(Puya clavaherculis Mez &amp; Sodiro)</i>	ACHUPALLA
<i>(Reneulmia alpinia)</i>	CHIANK
<i>(Solanum americanum Müll)</i>	MORTIÑO
<i>(Solanum dulcamara)</i>	DULCAMARA
<i>(Solanum guianensis)</i>	TAKUP
<i>(Solanum mamosum)</i>	TETA DE VACA
<i>(Spgelia multispica)</i>	SANTONINA
<i>(Cypresus prolixus)</i>	PIRIPRI
<i>(Tabernacomntan sannha)</i>	KUNAPIP
<i>(Uncaria tomatosa L.)</i>	APACH
<i>En identificación</i>	YUMPINK
<i>(Banisteriopsis capii)</i>	AYAHUASCA
<i>(Elephantus sp)</i>	MATA CARNERO
<i>En identificación</i>	HIERVA PAJARITO
<i>En identificación</i>	CANELO BLANCO
<i>En identificación</i>	INSULINA
<i>En identificación</i>	GUAYUSA
<i>En identificación</i>	ANEKRAT

#### 4. Conclusiones

Se ha logrado reconocer la riqueza biológica de alrededor de 1.000 especies de plantas de la amazonía mediante pruebas de evaluación biológica estandarizadas, la creación de estos Herbarios Didácticos contribuye al desarrollo de la ciencia, la medicina y las comunidades donde fueron colectadas.

#### 5. Discusión

El mayor logro de este trabajo es la participación de los estudiantes de las comunidades Shuar y Achuar, en un proyecto que les ha permitido reconocer la riqueza biológica en que ellos viven, coleccionar las plantas que

utilizan en su vida diaria, trabajar en el montaje de las muestras para el herbario y realizar pruebas de evaluación biológica estandarizadas y que se utilizan en las universidades europeas, permitiendo que se cumpla uno de los principales objetivos de la UPS, que es llegar a los más pobres con educación de calidad.

Las especies colectadas servirán de base para que los estudiantes de las carreras de Ingeniería en Biotecnología y Tecnología de los Recursos Amazónicos puedan realizar sus tesinas y tesis de grado.

Se ha creado dos herbarios didácticos, que permitirán a los estudiantes de las carreras de Ingeniería en Biotecnología de los Recursos Naturales y Tecnología de Los Recursos Amazónicos, familiarizarse con la botánica sistemática. Sería importante continuar con el trabajo de inventariar las especies vegetales de otras zonas de la provincia de Morona Santiago.

Se debe continuar con los trabajos de investigación sobre la actividad biológica de todas las plantas colectadas así como conocer su composición química, para lo cual se requiere seguir contando con el apoyo de las autoridades de la UPS para la continuidad de este proyecto.

## Bibliografía

- BERKOW, Robert *et al.*  
2000 *Manual Merck de Información Médica*, Edit. Océano, Barcelona, España.
- LOCK SING, Olga  
1994 *Investigación Fitoquímica*, PUCP - Fondo Editorial, Lima.
- MIRANDA, Miranda  
2000 *Farmacognosia Y Productos Naturales*, Facultad de Farmacia, Universidad de la Habana.
- PELCZAR, M.J. *et al.*  
2000 *Microbiología*, Edit. Zanichelli, Bologna, Italia.
- TYLER Varro *et al.*  
1979 *Farmacognosia*, Edit. El Ateneo, Buenos Aires, Argentina.
- VADEN Berge y otros  
*Screening Methods For Antibacterial And Antiviral Agents From Higher Plants*, Volumen 6, ISBN 0-12-461016-1.

VARIOS AUTORES

2004 *Fitoterapia, The Journal for the Study of Medicinal Plants*, Volumen 75/1. Edit. ELSEVIER.

VARIOS AUTORES

1997 *Manual de Técnicas del CYTED*, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Sub programa de Química Fina Farmacéutica Proyecto XI. Búsqueda de Principios Bioactivos de la Región.



# 5

## Evaluación y Disminución de Escorrentía y erosión, en zonas con fuerte pendiente, mediante la siembra y manejo de Vid (*Vitis vinífera*) en el cantón Paute

Hernán Avilés Landívar<sup>1</sup>, Pedro Velez Castro

### 1. Introducción

La erosión por escorrentía, es el proceso de degradación del suelo (Coronado M., 2003: 17-25) que causa un gran impacto ya que por su gran magnitud es irreversible. Este factor se presta por las propiedades intrínsecas del suelo (textura, estructura, estabilidad de los agregados, pendiente, infiltración, escurrimiento, velocidad de la escorrentía, presencia o no de barreras vivas, que determinan la erodabilidad.

La pendiente (grado, largo y forma) con la erosividad de la lluvia (frecuencia, intensidad y duración), la cobertura vegetal, son factores que determinan la velocidad erosiva.(Grupo de trabajo VID, 2004).

En la zona de investigación ubicada en el cantón Paute el factor erosivo es muy fuerte, con pérdidas abundantes de suelo, el cual se deposita en los lechos de quebradas y ríos.

Si bien es cierto, se han implementado sistemas de control erosivo mediante la siembra de determinadas especies forestales, y en lugares aptos para un normal desarrollo de las plantas.

En ningún caso, se ha utilizado una recomendación de siembra de vid, en sitios que tienen características de fuerte pendiente y un suelo degradado.

El abandono de estos sitios por parte de sus propietarios, sin considerar que existe una alternativa de uso de estos suelos, implementando un manejo y una especie adecuada, que al futuro le prestará ventajas, tanto de tipo conservacionista como económico.

Los suelos se degradan normalmente por su uso no acorde (Salazar, Melgarejo, 2005) con sus aptitudes y limitaciones edáficas. Por su origen, ubicación y pendiente poseen características intrínsecas, lo que determina su proceso de degradación.

En la zona de investigación predomina la configuración del perfil del suelo con pendientes pronunciadas, las mismas que son frágiles en el aspecto erosivo, así mismo los propietarios de los lotes los tienen subutilizados propiciando una degradación más rápida del suelo.

En el cantón Paute por su ubicación geográfica y sus condiciones medioambientales posibilita realizar esta investigación, con la participación directa de los propietarios de los predios, que en este momento se encuentran en estado de abandono.

## **Objetivos**

Los objetivos del proyecto son:

1. Evaluar el efecto del sistema propuesto sobre los niveles de erosión del suelo.
2. Determinar las causas de la erosión en la Zona de Paute, así como la alternativa más viable dentro de la familia de las VITACEAE para la mitigación de los efectos agresivos existentes.
3. Análisis del impacto en la biodiversidad existente con el cultivo propuesto.
4. Realizar un análisis económico de la alternativa de mejoramiento planteada.

5. Establecer un programa piloto de alternativas de controles erosivos, obteniendo un valor agregado en mediano plazo.

## **Hipótesis**

El sistema propuesto de siembra y manejo de la vid en sitios degradados con fuerte pendiente puede reducir la erodabilidad, propiciando una mejora en las características del suelo, influyendo en la biodiversidad y participando en el manejo sustentable de las pendientes.

## **Preguntas de investigación**

- ¿Qué cantidad de material sólido es arrastrado por efectos erosivos en sitios desprotegidos?
- ¿Qué cantidad de material sólido es arrastrado por efectos erosivos en sitios sembrados con vid?
- ¿Qué tipo de influencia tiene la siembra de vid en estos sitios, respecto a los propietarios de los lotes de investigación?
- ¿En que tiempo puede verificarse los resultados de la investigación respecto al cumplimiento de los objetivos?

## **2. Materiales y métodos**

### **Población de estudio**

Se escogió el cantón Paute por sus características geográficas, sus condiciones medioambientales y por el modo de vida de su gente, que al ser en gran medida dedicados a la agricultura y ganadería constituyen un potencial muy fuerte de abastecimiento de productos en el Austro.

### **Muestra representativa**

La ubicación geográfica referenciada a base de coordenadas UTM

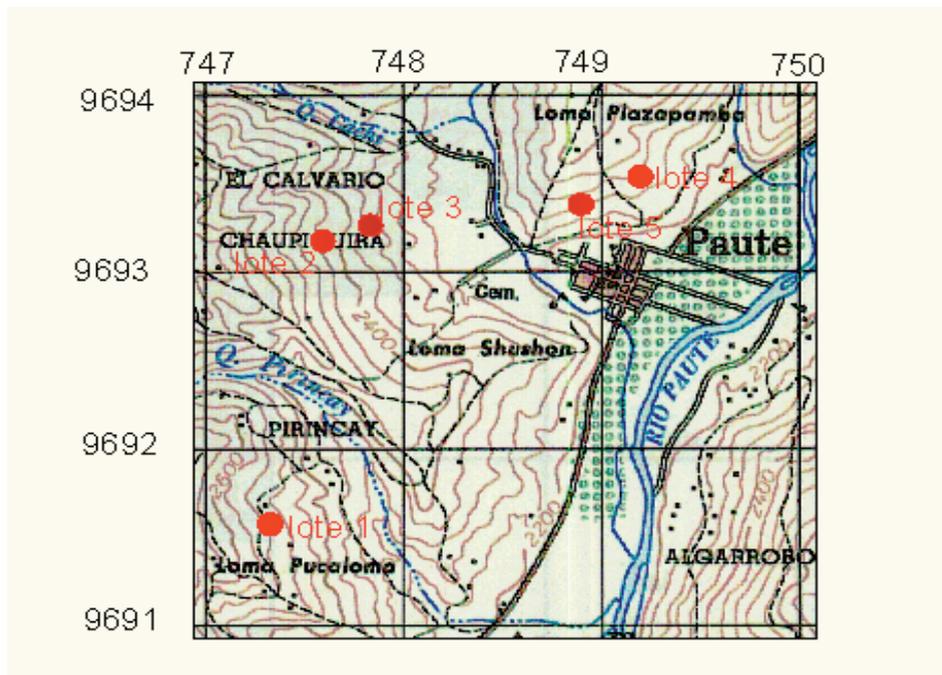


Figura 1. Ubicación georreferenciada de cada lote

Para determinar los materiales utilizados en el desarrollo del proyecto citamos:

#### Materiales Biológicos

- Corresponden al uso de clones para la reproducción de plantas de vid que serán sembradas en el sitio definitivo.
- Como base para el crecimiento inicial de las plántulas el sustrato utilizado consistió en una mezcla de limo, arcilla y materia orgánica.
- Se utilizaran, además, abono y fertilizante químico.

#### Materiales Físicos

- Infraestructura ( Umbráculo y vivero para la reproducción de plantas).

- Sistema de riego presurizado a nivel de vivero.
- Fundas plásticas.
- Teodolito, cinta, mira.
- GPS.
- Computadora.
- Programas de computación (Autocad).
- Laboratorio para análisis de suelo.
- Cámara fotográfica.
- Vehículo para transporte a los respectivos sitios de investigación.
- Lotes de terreno (5) ubicados en diferentes pendientes.
- Herramientas para cálculo de erosividad (estacas metálicas, tablas, regadera).
- Herramientas utilizadas para el cavado de hoyos y siembra de las plantas.

## **Métodos**

Al considerar lugares de topografía accidentada, es conveniente dar un tratamiento especial en cuanto al manejo y protección del suelo, es por tal motivo que en nuestro análisis fueron considerados parámetros como son: pendiente del terreno, superficie del terreno, distancia de siembra, número de plantas por ha, infiltración, velocidad de escorrentía, textura, estructura, pH del suelo, cantidad de material arrastrado.

Se realizaron medidas a nivel de campo, a nivel de vivero y a nivel de oficina. Las cuales se describen a continuación:

### **A nivel de campo**

Promoción del proyecto en los diferentes lugares propicios para la investigación.

A partir de visitas personales con los propietarios de los lotes y a la firma de un convenio, se posibilita la participación institucional y de la comunidad en las actividades.



Figuras 2-3. Recorrido de la zona para determinar lotes que intervienen en la investigación.



Figuras 3-4. Localización georreferenciada de cada uno de los lotes, mediante el uso de GPS.



Figuras 4-5. Determinación de la superficie y pendiente de cada uno de los lotes, mediante trabajo de campo y oficina.



Figuras 6-7. Estudio de la flora existente en cada uno de los lotes.



Figuras 8-9. Toma de muestra de suelo en cada lote para su respectivo análisis.



Figuras 10-11. Trazado de curvas de nivel y señalamiento de los respectivos lugares donde serán sembradas las plantas.



Figuras 11-12. Verificación del sistema radicular previo a la siembra.  
Siembra de las plantas.



Figuras 13-14. Seguimiento y control de las actividades realizadas en el proyecto.

## A nivel de vivero



Figuras 1-2. Recolección de material vegetativo y estratificación de clones.



Figuras 3-4. Enfundado de sustrato a nivel de umbráculo.



Figuras 5-6. Siembra de clones en fundas a nivel de umbráculo.



Figuras 7-8. Manejo y mantenimiento técnico de los clones en desarrollo (desyerbas, riegos, fertilización, resiembra etc).



Figuras 9-10. Manejo en el patio de aclimatación de plántulas prendidas.

### A nivel de oficina

1. Investigación bibliográfica sobre la temática.
2. Elaboración de los cronogramas de actividades.
3. Elaboración de informes.
4. Interpretación de datos recolectados a nivel de campo, mediante técnicas propias para cada información.

### Consideraciones teóricas

Dependiendo de los rangos, los suelos pueden ser clasificados se presenta en la Tabla 1 seguir:

Tabla 1. Rangos, categorías de pendientes

Rangos %	Clasificación
0-3	Plana a casi plana
3-8	Débilmente inclinada
8-16	Inclinada
16-30	Moderadamente escarpada
<b>30-65</b>	<b><i>Escarpada</i></b>
> 65	Muy escarpada

Fuente: [www.vendimia.cl/veredicionanterior.php?edicion=20&id](http://www.vendimia.cl/veredicionanterior.php?edicion=20&id)

### En busca de la pendiente

Cada vez es más común ubicar vides en laderas (Grupo de trabajo VID, 2004). La siembra se realiza a favor de la pendiente, para así evitar el movimiento excesivo del suelo, y por consiguiente la erosión. Con este tipo de plantación se pretende establecer viñedos en suelos más pobres y cuyas profundidades son muy inferiores a las de que hay en los valles.

Las diferencias entre plantaciones ubicadas en el plano y otro en la empinada ladera son numerosas y la mayoría están relacionadas con la fuerza de gravedad. Aunque depende mucho del grado de inclinación en el que se ubique la plantación, el aspecto erosivo, ayudado por la fuerza de gravedad, han hecho que los suelos laderosos sean menos profundos y con una menor cantidad de materia orgánica. (Ricardo, H.; Bonelli, C., 2002).

Los suelos inclinados, si bien no son buenos porque son muy delgados, a veces tienen arcillas muy densas, son recomendables desde el punto de vista de la exposición solar, así como también por la capacidad de campo que es baja lo que influye directamente en el cultivo de la vid, ya que ésta no soporta terrenos muy húmedos. (Coronado, M., 2003).

No todas las variedades de vid se adaptan a las mismas tierras (Consejo orgánico [www.consejo.org.ar/coltec/ferrario](http://www.consejo.org.ar/coltec/ferrario) IRII, 2007). Algunas cepas se acomodan a suelos arenosos, pedregosos y secos como el *Cabernet*

*Sauvignon* y el *Syrah* dando características frutales bien definidas. (Medidas de Control de la erosión, 2007, ([www. Cdeea.com/agorganica.htm](http://www.Cdeea.com/agorganica.htm)). Al sembrar vid, se debe considerar que no todos los suelos son aptos para cualquier variedad, en todo caso es necesario un estudio minucioso.

También se puede apreciar que se buscan terrenos pobres de buen drenaje, de bajo nivel productivo, teniendo como objetivo disminuir la erosión y obtener menor cantidad de fruta, pero con mayor concentración. Algunas de las técnicas son la siembra directa sin laboreo, el laboreo reducido a su mínima expresión, la no incorporación -o la incorporación parcial- de los restos de cosecha, y el establecimiento de cubiertas vegetales para proteger el suelo en cultivos leñosos (árboles y arbustos utilizados para la obtención de frutos o planta forestal). Al parecer, la agricultura de conservación es tan rentable como la convencional, si bien exige gastos iniciales elevados. (Coronado, M., 2003).

Este tipo de agricultura incorpora técnicas que reducen, cambian o eliminan el arado del suelo y evitan la quema de rastrojo para mantener una suficiente cobertura de residuos vegetales en el suelo a lo largo de todo el año. De esta forma, el suelo queda protegido de la erosión y del agua de la lluvia, a la vez que aumenta de forma natural su estabilidad, su contenido orgánico y su nivel de fertilidad. Todo ello contribuye a disminuir en gran medida la contaminación de las aguas superficiales y la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, además de favorecer la biodiversidad. Para mantener una fisiología normal a lo largo de su vida, la vid tiene un periodo de reposo anual (agostamiento), la planta no muestra actividad vegetativa aparente y no hay crecimiento ni floración, sean las que fueren las condiciones ambientales momentáneas. Algunos procesos fisiológicos, tales como la absorción radicular, la traslocación vascular, la respiración, la fotosíntesis y la transpiración, pueden tener lugar en forma lenta.

## **Aportes del proyecto**

La realización del presente proyecto implementa una nueva metodología en el campo de conservación de suelos. Esta metodología consiste, como primer paso en el análisis del problema que provoca la erosión,

seguido de la determinación de la cantidad de materiales sólidos arrastrados hacia las partes bajas o lechos de ríos y quebradas.

El abandono de predios erosionados por parte de sus dueños, con la consecuente disminución de la superficie con aptitud agrícola constituye un problema importante en la región. En el presente proyecto se analiza una alternativa técnicamente viable para remediar y mitigar esta situación, tomando en cuenta la situación social de los participantes en el proyecto.

La posibilidad de convertir los resultados del proyecto en un modelo de trabajo conjunto con las instituciones dedicadas a labores de forestación, mitigación de impactos ambientales, etc., y la Universidad.

### 3. Resultados obtenidos en la primera fase del proyecto

El proyecto tiene una duración de tres años. Los resultados obtenidos en el primer año son presentados a continuación.

Las actividades realizadas, conjuntamente con los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del proyecto.

<i>Actividades Realizadas</i>	<i>Datos relevantes</i>	<i>VARIABLES tomadas en cuenta</i>	<i>Resultados.</i>
1. Determinación de espacios para realizar el proyecto.  Determinación de la superficie en Ha	5 lotes.	Sitios o lugares aptos para la investigación, se encuentran desprovistos de vegetación, con una pendiente pronunciada y alta elocidad de escorrentía.	1. Se determinó de los espacios para la realización del proyecto serán 5 lotes con suelos degradados, que por situaciones de deforestación, mal manejo han sido abandonados.
2. Promoción del proyecto.  Determinación de los % de pendiente	5 lotes	Propietarios de lotes que participan en el proyecto	2. Predios con características requeridas. Se considera un potencial que sirva de referencia para trabajos futuros.
3. Medición y ubicación digitalizada.	4 ha.	Superficies o áreas que serán utilizadas. Delimitación y georreferencia con GPS	3. Lotes en diferentes lugares. Por las condiciones climáticas de la zona, considerando una altitud promedio, para la adaptabilidad.
4. Los objetivos del proyecto. Con resultados parciales propiciar el involucramiento de instituciones afines a la actividad.		Mediante conversaciones con diferentes instituciones, se hace conocer el proyecto, con la posibilidad de futuros convenios.	4. Posibilidad de involucramiento institucional. Considerando la importancia de del manejo sustentable en el manejo del medio ambiente.

<i>Actividades Realizadas</i>	<i>Datos relevantes</i>	<i>Variables tomadas en cuenta</i>	<i>Resultados.</i>
5.Obtención de plantas en producción. Características fisiológicas aptas para la selección de clones.	7.000 Estacas	Material vegetativo (clones).	5. Recolección de estacas, o clones adaptados al medio, lo que facilita un rápido desarrollo vegetativo del cultivo.
6.Suelo arenoso- materia orgánica. Considerando las características del suelo base.	8 m <sup>3</sup>	Sustrato adecuado para la reproducción.	6. Obtención de suelo. Que tenga características semejantes de estructura y textura al de las zonas que serán sembradas.
Elementos químicos que promueven la emisión de partes vegetativas en los clones.	7.000 estacas	Activación para emisión de sistema radicular.	7. Proceso de reproducción. Con un adecuado manejo a nivel de vivero.
Estructura protegida "sarán".  Brindar condiciones aptas para el desarrollo	5.000 plantas	Manejo a nivel de vivero	8. Obtención de plantas, vigorosas que cumplan condiciones requeridas para el replante.
Condiciones ambientales naturales en donde serán sembradas las plantas en forma definitiva.	5.000 plantas	A campo abierto	9. Aclimatación de plantas enraizadas dando lugar a un rápido prendido en el sitio definitivo.
Condiciones del suelo, para determinar metodología de análisis a utilizar.	5 muestras	Contenido de: M.O. pH, textura, estructura, intercambio catiónico, infiltración.	10. Análisis de suelo de los diferentes predios, datos elementales para la correcta recomendación en el manejo del cultivo.
Rápida velocidad de escorrentía, lo que propicia el uso de métodos preventivos.	5 lotes	Mayores al 40% con la utilización de aparatos de precisión.	11. Pendientes pronunciadas, las mismas que por su ubicación geográfica son difíciles de trabajar.
Análisis de escorrentía, erosividad. Ubicación conveniente para realizar los análisis.	15 parcelas	Delimitación 2 m <sup>2</sup> cada una	12. Parcelas de escorrentía. Segmentos adicionales que sirven para muestreo y toma de datos referidos a la erodabilidad.
Cantidad de suelo lavado. Medición de escorrentía, infiltración. Calcular valores en volumen m <sup>3</sup> de material arrastrado por unidad de superficie	15 parcelas	Métodos científicos para determinar valores.	*Obtención de valores numéricos en relación al arrastre de materiales.
Todos los elementos que participan, condiciones climáticas desfavorables.	5 lotes	FODA	14. Consolidación del proyecto.
Sistema radicular definido, plantas vigorosas.	1 lote	Plantas adecuadas para la siembra definitiva.	15. Traslado de insumos y plantas a los lugares de siembra.
Insumos y método de siembra labranza mínima.	1 lote	Mediante parámetros basados en análisis técnicos anteriores.	16. Siembra de plantas, considerando una condición climática favorable para esta labor.
Mano de obra, técnicos que analicen los diferentes parámetros.	1 lote	Mediante desyerbas, riegos y cuidados periódicos.	17. Manejo y cuidados de la siembra, referidos a futuros riegos, desyerbas, coronas, podas etc.

*La determinación de estos valores están en función del avance de siembra en los diferentes lotes, al momento la siembra se ha realizado en 1 lote, faltando los 4 restantes.*

#### 4. Conclusiones

La investigación pretende demostrar que los lugares involucrados en el proyecto, por sus características topográficas, pueden generar utilidad ambiental y económica a los involucrados; así mismo generar un efecto en el paisaje, lo que conlleva a un aumento en la micro flora y micro fauna obteniendo una biodiversidad con una especie exótica.

Se puede manifestar que mediante el avance del proyecto se ha divulgado el mismo a ciertas instancias que tiene que ver con el desarrollo agrícola y ambiental de la zona. Provocando curiosidad e interés por conocer sobre el cultivo dado en estas condiciones.

El involucramiento directo de personas dedicadas a la actividad agrícola, participando en esta alternativa de cultivo, así mismo la duda de que si vale o no la pena dedicar parte de su tiempo al desarrollo de la actividad.

La obtención de lotes previamente delineados, a una distancia de siembra conveniente entre plantas.

Le siembra de esta especie en los diferentes lotes, y el inicio de la evaluación en cuanto a la medición de la erodabilidad

Un manejo de suelo con labranza mínima.

#### Bibliografía

CORONADO, M.

2003 *Manejo ecológico del suelo*. Elaboración técnica. CIED.

2004 Grupo de trabajo VID ISBN:8476.-218 Edición.

RICARDO, H.; BONELLI, C.

2002 *Suelos degradados y agricultura sustentable*.

RUÍZ, Manuel

2001 *Variedades de la vid y calidad de los vinos*. ISBN S489992-50-0

SALAZAR, M.; MELGAREJO, P.

2005 *Técnicas de cultivo de vid.*

MARFÁ, O, Save

2007 *www.Agentes forestales. Net/variados*. Revisado mayo.

Consejo Orgánico

2007 *www.consejo.org.ar/coltec/ferrario* IRII. Revisado marzo.

*www. Cdeea.com/agorganica.htm. Medidas de control de la erosión. Revisado Abril 2007*

Martinez de Toda F.

2007 *www.vendimia.cl/veredicionanterior.php?edicion=20&id*. Revisado mayo.

# 6

## Aplicación del biodiesel para motores de encendido por compresión con la finalidad de reducir las emisiones contaminantes en la ciudad de Cuenca

Fernando Chica Segovia<sup>1</sup>,  
Jaime Antonio Zhunio Morocho<sup>2</sup>, Javier Teodoro Rodas López<sup>2</sup>

### 1. Introducción

Los vehículos motorizados representan la mitad de las emisiones que causan smog, todo el monóxido de carbono en los centros de las ciudades, más de 25% de las partículas finas y más de la mitad de los contaminantes tóxicos del aire. El problema aumenta cuando el parque automotor es excesivo y vetusto. Esto sumado a la falta de mantenimiento de los automotores; el manejo ineficiente del tránsito sin leyes ni reglamentos rigurosos, la insuficiente difusión del problema y consecuentemente la falta de una conciencia ciudadana al tema de la contaminación, hacen del smog un tema altamente preocupante en nuestra ciudad.

La ciudad de Cuenca posee un parque automotor que está alrededor de 80.000 vehículos (según datos de Cuencaire), si comparámos con ciudades de mayor tamaño y población podríamos concluir que el parque automotor es excesivo.

Este aumento descontrolado de los vehículos motorizados está originando problemas ambientales y sociales como en las grandes urbes. Los

---

1 Director del Proyecto de investigación, Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

2 Egresados de la Carrera de ingeniería Automotriz, Asistentes de investigación.

gases tóxicos que son expulsados diariamente por los tubos de escape causan afecciones a la salud de la población y aportan a los problemas ambientales como el calentamiento global y el cambio climático.

Por lo citado anteriormente es necesario buscar alternativas viables a los problemas que surgen de la quema de combustible fósiles; una de éstas es el uso de combustibles alternos como el Biodiesel, además se debe considerar que a futuro puede producirse una crisis energética, debido a la disminución de las reservas de petróleo, sobre todo por la escalada abrupta de su precio.

En el Ecuador, actualmente, se produce alrededor de 5.000 toneladas de biodiesel al mes procedente del aceite de la palma africana (Palm metil ester), el cual es exportado a Norteamérica.

Con el fin de reducir las emisiones contaminantes en Cuenca, este proyecto propone aprovechar la energía más limpia que provee el biocombustible, como una alternativa a corto y mediano plazo.

## **2. Materiales y métodos**

Los materiales y métodos usados en este proyecto se describen de la siguiente manera:

### **2.1 Materiales**

Los materiales utilizados en la ejecución del presente proyecto se detallan a continuación:

- Biodiesel B100 PME (Pal-Metil-Ester) D6751 (ASTM). Al 100% este producto se utiliza como combustible total o parcial para motores diesel; utilizado durante las pruebas con la finalidad de disminuir la emisión de gases contaminantes.
- Diesel II, combustible líquido derivado del petróleo, con 0,70% de azufre Norma INEN 810; utilizado como combustible para motores diesel.

- Diesel Premium, combustible líquido derivado del petróleo, con un máximo de 0,05% de azufre Norma INEN 1489, utilizado como combustible mejorado para motores diesel, con la finalidad de reducir el material particulado.
- B5 Mezcla de Biodiesel PME (Pal-Metil-Ester) al 5% en Diesel Premium. utilizado en el proyecto como prueba, con la finalidad de reducir la emisión de gases contaminantes.
- B10 Mezcla de Biodiesel PME (Pal-Metil-Ester) al 10% en Diesel Premium. utilizado en el proyecto como prueba, con la finalidad de reducir la emisión de gases contaminantes.

## 2.2 Métodos

Los métodos utilizados en la ejecución del presente proyecto se describen a continuación, recalcando que para simplificar la explicación nos referiremos únicamente al primer equipo utilizado y al primer motor sometido a las pruebas; y el trabajo completo del proyecto se presentará en otro documento que reposa en el Departamento de Coordinación de Investigación de la UPS.

La metodología de medición que se usó, es la indicada en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 3 de “Métodos y equipos de medición de emisiones desde fuentes fijas de combustión”, Numeral 4.2 y sus anexos, que expresan lo siguiente:

*4.2.2.5 Ubicación de puertos de muestreo. Los puertos de muestreo se colocarán a una distancia de, al menos, ocho diámetros de chimenea corriente abajo y dos diámetros de chimenea corriente arriba de una perturbación al flujo normal de gases de combustión. Se entiende por perturbación cualquier codo, contracción o expansión que posee la chimenea o conducto. En conductos de sección rectangular, se utilizará el mismo criterio, salvo que la ubicación de los puertos de muestreo se definirá en base al diámetro equivalente del conducto...*

Para iniciar las pruebas y de acuerdo a la referida normativa, se construyó un tubo de escape de hierro, desde el motor el cual tiene un diáme-

tro de 75 milímetros y una longitud de 900 milímetros. La medición se realizó a una distancia de 8 diámetros desde la última perturbación (Ensanchamiento del tubo en su conexión con el colector de escape del motor) a 600 milímetros de la misma, se realizó un agujero de 8 milímetros de diámetro para introducir la sonda del Equipo hasta la mitad del diámetro de la chimenea (interiormente a 37 milímetros desde la pared del tubo de escape). Ver Fig. 1:

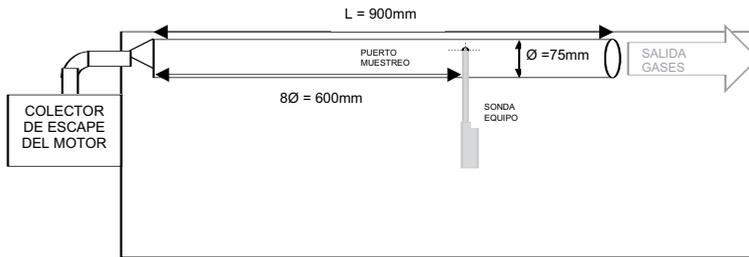


Figura 1. Disposición de la sonda de muestreo del Equipo

**Equipo Analizador.** el equipo usado para la medición es un analizador de celdas electroquímicas según lo estipulado en el mismo texto de legislación ambiental en su numeral 4.2.2.17 al 4.2.2.20.

Las mediciones fueron realizadas con un Equipo de medición de gases de combustión TESTO 350 M/XL. El equipo tiene instalado sensores electroquímicos para detección de gases: O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y sensor de temperatura de gases.

El Equipo TESTO 350 XL fue ajustado y calibrado a las siguientes condiciones:

Parámetro	Unidad	Rango de detección	Exactitud
Temperatura	° C	40 - 1200	± 0,5% valor medido
O <sub>2</sub>	%v	0 - 25	± 0,8% valor final
CO	Ppm	0 - 10000	± 10% valor medido
NO	Ppm	0 - 3000	± 5% valor medido
NO <sub>2</sub>	ppm	0 - 500	± 5% valor medido
SO <sub>2</sub>	ppm	0 - 5000	± 5% valor medido
CO <sub>2</sub>	%v	0 - CO <sub>2</sub> MAX	Calculado a partir del O <sub>2</sub>
Velocidad	m/s	1 - 30	Factor calib. = 0,67

Tipo de Combustible:	Diesel (Líquidos Fuel oil 1)
Presión Atmosférica dada por altura:	560 mmHg (733mbar)
Altura:	2560m SNM
Factor de Compensación:	1,00
Diámetro de detección:	0,075metros (área = 0,0044m <sup>2</sup> )
Programa:	No. Valores = 60; Tiempo Gas = 10min;
Tiempo Aire = 6min; Tiempo	Limpiar = 2min. Tiempo total = 18 minutos.

**Medición de gases del motor de combustión.** La Metodología utilizada para la medición de gases en los Motores de Combustión fue basada en la Normativa Ecuatoriana en su Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 3 de “Motores de Combustión Interna”, en el numeral 4.3.6.

**Proceso de Medición de Gases de Escape.** Se realizó las mediciones de concentración de gases de combustión en el tubo de escape del Motor Diesel Marca JET modelo F-300 de 5,5 HP y 3000 RPM, con un cilindraje de 0,296 litros, a una temperatura ambiente externa promedio de 18° C; además el motor ha sido encendido a media carga (aceleración) en todos los muestreos, para mantener las mismas condiciones.

La medición se realizó en cinco combustibles: a) DIESEL-2, b) DIESEL PREMIUM, c) BIODIESEL PME (Pal-Metil-Ester) B-100, d) MEZCLA B-10 (Biodiesel PME al 10% en Diesel Premium), e) MEZCLA B-5 (Biodiesel PME al 5% en Diesel Premium).

Cabe destacar que los Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son producidos por la combustión incompleta de combustibles fósiles y por un sobrecalentamiento de los gases de combustión. El Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) está determinado por el contenido de azufre que posee el combustible Diesel. El Monóxido de Carbono (CO) es producido por una combustión incompleta del combustible y generalmente está acompañado de la generación de partículas de hollín.

### 3. Resultados

Los resultados de la medición de gases de escape se detallan a continuación:

**Prueba con Combustible “Diesel II”.** la prueba se realizó con el motor quemando DIESEL II, con una duración de 10 minutos efectivos de medición.

En la Tabla 1, se muestra los valores de concentración de CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm); O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en porcentaje, y la temperatura de gases (° C) y sus promedios ya transformados para fines de comparación con la normativa.

Tabla 1. Datos obtenidos en el muestreo de Gases de Combustión con el combustible “Diesel-II” (29/01/2008).

	Promedios	Máximos	Emisión mg/Nm <sup>3</sup> Corregido al 15% de O <sub>2</sub> **
Porcentaje de Oxígeno (%O <sub>2</sub> )	16,92	16,95	---
Porcentaje de dióxido de carbono (%CO <sub>2</sub> ) *	3,09	---	---
Concentración de monóxido de carbono (ppm CO)	2706,87	3201,00	5016,1
Concentración de óxido nítrico (ppm NO)	49,37	68,00	---
Concentración de dióxido de nitrógeno (ppm NO <sub>2</sub> )	25,35	29,00	---
Concentración de óxidos de nitrógeno (ppm NO <sub>x</sub> )	74,68	96,00	227,4
Concentración de Dióxido de azufre (ppm SO <sub>2</sub> )	15,13	27,00	64,1
Temp. gases (° C)	102,06	108,50	---

\* Obtenido por la fórmula del CO<sub>2</sub> máximo: %CO = (CO<sub>2</sub>máx \* (21% - %O<sub>2</sub>)) / (21%).

\*\* Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la Legislación Ambiental Libro VI, Anexo 3 en su numeral 4.3.6: “Motores de Combustión Interna”.

En la Tabla 2, se presenta las concentraciones de los gases que se han obtenido de la medición y su comparación con el límite normativo vigente:

Tabla 2. Comparación de los valores de Concentración de gases de la prueba con DIESEL-II frente a Normativa ambiental Vigente. (29/01/2008).

GAS (mg/Nm <sup>3</sup> )	Promedio	Limite según Normativa <sup>2</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
Monóxido de carbono (CO)	5016,1	n/a
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	227,4	2.000
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	64,1	1.500

<sup>1</sup> Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la legislación (Las concentraciones de gases no sobrepasan el valor limite normativo aplicable).

**Prueba con Combustible “Diesel Premium”.** La prueba se realizó con el motor quemando DIESEL PREMIUM. La prueba duró 10 minutos efectivos de medición.

En la Tabla 3, se muestra los valores de concentración de CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm); O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en porcentaje, y la temperatura de gases (° C) y sus promedios ya transformados para fines de comparación con la normativa.

Tabla 3. Datos obtenidos en el muestreo de Gases de Combustión con el combustible “DIESEL PREMIUM” (29/01/2008).

	Promedios	Máximos	Emisión mg/Nm <sup>3</sup> Corregido al 15% de O <sub>2</sub> **
Porcentaje de oxígeno (%O <sub>2</sub> )	17,00	17,03	—
Porcentaje de dióxido de carbono (%CO <sub>2</sub> ) *	3,03	—	—
Concentración de monóxido de carbono (ppm CO)	2.285,35	2507,00	4.324,2
Concentración de óxido nítrico (ppm NO)	53,80	66,00	—
Concentración de dióxido de nitrógeno (ppm NO <sub>2</sub> )	36,28	38,60	—
Concentración de óxidos de nitrógeno (ppm NO <sub>x</sub> )	90,02	104,00	279,8
Concentración de dióxido de azufre (ppm SO <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,00
Temp. Gases (° C)	96,22	102,70	—

\* Obtenido por la fórmula del CO<sub>2</sub> máximo: %CO = (CO<sub>2</sub>máx \* (21% - %O<sub>2</sub>)) / (21%).

\*\* Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la Legislación Ambiental Libro VI, Anexo 3 en su numeral 4.3.6: “Motores de Combustión Interna”.

En la Tabla 4, se presenta las concentraciones de los gases que se han obtenido de la medición y su comparación con el límite normativo vigente:

Tabla 4. Comparación de los valores de Concentración de gases de la prueba con DIESEL PREMIUM frente a Normativa ambiental Vigente. (29/01/2008).

GAS (mg/Nm <sup>3</sup> )	Promedio	Límite según Normativa <sup>2</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
Monóxido de carbono (CO)	4324,2	n/a
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	279,8	2.000
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0,0	1.500

1 *Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la legislación, (las concentraciones de gases no detectadas no sobrepasan el valor límite normativo aplicable).*

**Prueba con Combustible “Biodiesel PME (Pal-Metil-Ester) B-100.”**  
la prueba se realizó con el motor quemando BIODIESEL PME (Pal-Metil-Ester) B-100. La prueba duró 10 minutos efectivos de medición.

En la Tabla 5, se muestra los valores de concentración de CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm); O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en porcentaje, y la temperatura de gases (° C) y sus promedios ya transformados para fines de comparación con la normativa.

Tabla 5. Datos obtenidos en el muestreo de Gases de Combustión con el combustible “BIODIESEL PME B-100” (29/01/2008).

	Promedios	Máximos	Emisión mg/Nm <sup>3</sup> Corregido al 15% de O <sub>2</sub> **
Porcentaje de oxígeno (%O <sub>2</sub> )	17,00	17,06	---
Porcentaje de dióxido de carbón (%CO <sub>2</sub> ) *	3,03	---	---
Concentración de monóxido de carbón (ppm CO)	1.297,78	1.471,00	2.451,7
Concentración de óxido nítrico (ppm NO)	93,27	102,00	---
Concentración de dióxido de nitrógeno (ppm NO <sub>2</sub> )	53,31	60,80	---
Concentración de óxidos de nitrógeno (ppm NO <sub>x</sub> )	146,52	160,00	454,7
Concentración de dióxido de azufre (ppm SO <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,0
Temp. gases (° C)	100,87	104,90	---

\* *Obtenido por la fórmula del CO<sub>2</sub> máximo: %CO = (CO<sub>2</sub>máx \* (21% - %O<sub>2</sub>)) / (21%).*

\*\* *Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la Legislación Ambiental Libro VI, Anexo 3 en su numeral 4.3.6: “Motores de Combustión Interna”.*

En la Tabla 6 se presenta las concentraciones de los gases que se han obtenido de la medición y su comparación con el límite normativo vigente:

Tabla 6. Comparación de los valores de Concentración de gases de la prueba con BIODIESEL PME B-100 frente a Normativa ambiental Vigente. (29/01/2008)

GAS (mg/Nm <sup>3</sup> )	Promedio	Límite según Normativa <sup>2</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
Monóxido de Carbono (CO)	2.451,7	n/a
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	454,7	2.000
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	0,0	1.500

1 Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la legislación.

**Prueba con “Mezcla de Combustible B-10 (Biodiesel PMA al 10% en Diesel Premium)”**. la prueba se realizó con el motor quemando MEZCLA DE COMBUSTIBLE B-10 (Biodiesel PME al 10% en Diesel Premium). La prueba duró 10 minutos efectivos de medición.

En la Tabla 7, se muestra los valores de concentración de CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm); O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en porcentaje, y la temperatura de gases (° C) y sus promedios ya transformados para fines de comparación con la normativa.

Tabla 7. Datos obtenidos en el muestreo de Gases de Combustión con “MEZCLA DE COMBUSTIBLE B-10 (Biodiesel PME al 10% en Diesel Premium)” (29/01/2008).

	Promedios	Máximos	Emisión mg/Nm <sup>3</sup> Corregido al 15% de O <sub>2</sub> **
Porcentaje de oxígeno (%O <sub>2</sub> )	17,04	17,94	---
Porcentaje de dióxido de carbono (%CO <sub>2</sub> ) *	3,00	---	---
Concentración de monóxido de carbono (ppm CO)	2133,28	2.216,00	4.076,1
Concentración de óxido nítrico (ppm NO)	60,02	71,00	---
Concentración de dióxido de nitrógeno (ppm NO <sub>2</sub> )	46,49	55,40	---
Concentración de óxidos de nitrógeno (ppm NO <sub>x</sub> )	106,53	115,00	334,4
Concentración de dióxido de azufre (ppm SO <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,0
Temp. Gases (° C)	91,80	101,00	---

\* Obtenido por la fórmula del CO<sub>2</sub> máximo: %CO = (CO<sub>2</sub>máx \* (21% - %O<sub>2</sub>)) / (21%).

\*\* Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la Legislación Ambiental Libro VI, Anexo 3 en su numeral 4.3.6: “Motores de Combustión Interna”.

En la Tabla 8, se presenta las concentraciones de los gases que se han obtenido de la medición y su comparación con el límite normativo vigente:

Tabla 8. Comparación de los valores de Concentración de gases de la prueba con MEZCLA DE COMBUSTIBLE B-10, frente a Normativa ambiental Vigente. (29/01/2008).

GAS (mg/Nm <sup>3</sup> )	Promedio	Límite según Normativa <sup>2</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
Monóxido de carbono (CO)	4.076,1	n/a
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	334,4	2.000
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0,0	1.500

1 Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la legislación.

**Prueba con “Mezcla de Combustible B-5 (Biodiesel PMA al 5% en Diesel Premium)”**. La prueba se realizó con el motor quemando MEZCLA DE COMBUSTIBLE B-5 (Biodiesel PME al 5% en Diesel Premium). La prueba duró 10 minutos efectivos de medición. (Fue llevada cabo el día 31 de enero de 2008).

En la Tabla 9, se muestra los valores de concentración de CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm); O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en porcentaje, y la temperatura de gases (° C) y sus promedios ya transformados para fines de comparación con la normativa.

Tabla 9. Datos obtenidos en el muestreo de Gases de Combustión con “MEZCLA DE COMBUSTIBLE B-5 (Biodiesel PME al 5% en Diesel Premium)” (31/01/2008).

	Promedios	Máximos	Emisión mg/Nm <sup>3</sup> Corregido al 15% de O <sub>2</sub> **
Porcentaje de oxígeno (%O <sub>2</sub> )	17,03	17,10	—
Porcentaje de dióxido de carbono (%CO <sub>2</sub> ) *	3,00	—	—
Concentración de monóxido de carbono (ppm CO)	2.141,18	2.404,00	4.082,4
Concentración de óxido nítrico (ppm NO)	68,68	89,00	—
Concentración de dióxido de nitrógeno (ppm NO <sub>2</sub> )	40,84	42,50	—
Concentración de óxidos de nitrógeno (ppm NO <sub>x</sub> )	109,50	128,00	343,0
Concentración de dióxido de azufre (ppm SO <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,0
Temp. Gases (° C)	92,90	99,20	—

\* Obtenido por la fórmula del CO<sub>2</sub> máximo: %CO = (CO<sub>2</sub>máx \* (21% - %O<sub>2</sub>)) / (21%).

\*\* Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la Legislación Ambiental Libro VI, Anexo 3 en su numeral 4.3.6: “Motores de Combustión Interna”.

En la Tabla 10, se presenta las concentraciones de los gases que se han obtenido de la medición y su comparación con el límite normativo vigente:

Tabla 10. Comparación de los valores de Concentración de gases de la prueba con MEZCLA DE COMBUSTIBLE B-5, frente a Normativa ambiental Vigente. (31/01/2008).

GAS (mg/Nm <sup>3</sup> )	Promedio	Límite según Normativa <sup>2</sup> (mg/Nm <sup>3</sup> )
Monóxido de Carbono (CO)	4.082,4	n/a
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	343,0	2.000
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	0,0	1.500

1 Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la legislación.

## **Análisis de resultados**

A continuación se presentan el análisis de gases de escape con los distintos combustibles y mezclas de combustible.

### **Análisis de Gases de Combustión con Diesel-II**

- La curva de Monóxido de Carbono (CO) presenta una ligera disminución a lo largo del tiempo, lo que puede ser debido a la entrada en régimen del motor, que hace que la combustión sea más eficiente a lo largo del tiempo, con el calentamiento progresivo del sistema.
- Las curvas de Óxidos de Nitrógeno (NOx) presentan un incremento proporcional a lo largo del tiempo, caso contrario sucede con la curva de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) que presenta una disminución a lo largo del tiempo.
- Las concentraciones promedio y máxima de todos los gases, no sobrepasan límites normativos estipulados en la legislación ambiental para motores de combustión interna.

### **Análisis de Gases de Combustión con Diesel Premium**

- La curva de Monóxido de Carbono (CO) presenta una ligera disminución a lo largo del tiempo.
- Las curvas de Óxidos de Nitrógeno (NOx) presentan un incremento proporcional con el tiempo, lo cual está en función del calentamiento del motor y los gases de combustión.
- El equipo no detectó concentraciones de SO<sub>2</sub> para este tipo de combustible, por lo que no existe curva de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>).
- Las concentraciones promedio y máxima de todos los gases, no sobrepasan los límites normativos estipulados en la legislación ambiental para motores de combustión interna.

### **Análisis de Gases de Combustión con Biodiesel PME B-100**

- La curva de Monóxido de Carbono (CO) permanece casi constante a lo largo del tiempo, lo cual indica que la combustión es estable, sin

embargo existe un ligero incremento de los gases Óxidos de Nitrógeno, que está en función de la temperatura de combustión.

- No se detectaron emisiones de Dióxido de Azufre, ya que el combustible Biodiesel B-100 no tiene azufre en su composición o es mínimo, por lo que no se da la formación de este gas.
- Las concentraciones promedio y máxima de todos los gases, no sobrepasan los límites normativos estipulados en la legislación ambiental para motores de combustión interna.

#### **Análisis de Gases de Combustión con Mezcla de Combustible B-10**

- La curva de Monóxido de Carbono (CO) no presenta una mayor variación a lo largo del tiempo al igual que las curvas de NOx.
- No existe curva de Dióxido de Azufre, lo que puede deberse a que este combustible no tiene o es casi despreciable el contenido de azufre.
- Las concentraciones promedio y máxima de todos los gases, no sobrepasan los límites normativos estipulados en la legislación ambiental para motores de combustión interna.

#### **Análisis de gases de Combustión con Mezcla de Combustible B-5**

- Las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO) y de Óxidos de Nitrógeno, no varían notablemente a lo largo del tiempo, a pesar del progresivo calentamiento del sistema.
- No se detectaron concentraciones de Dióxido de Azufre, para este tipo de combustible.
- Las concentraciones promedio y máxima de todos los gases, no sobrepasan los límites normativos estipulados en la legislación ambiental para motores de combustión interna.

#### **Análisis comparativo de parámetros**

Las figuras que a continuación se presentan muestran los diferentes parámetros obtenidos en cada muestreo, para fines comparativos:

## Comparación de Concentraciones de Monóxido de Carbono (CO) versus el tipo de Combustible

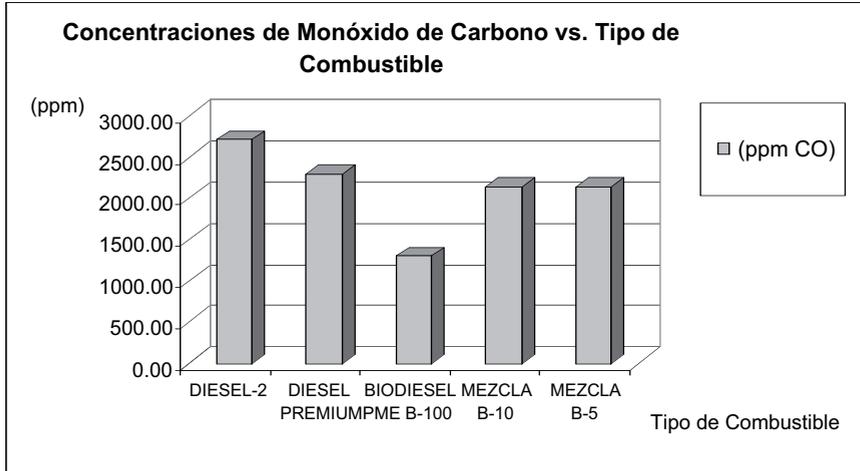


Figura 2. Monóxido de Carbono (CO) versus el Tipo de Combustible.

- Se observa que la concentración promedio del Monóxido de Carbono es diferente con cada tipo de combustible, siendo la más alta con el Diesel-2 y la más baja con el Biodiesel B-100.
- El Diesel Premium también presenta una menor cantidad de CO producido.
- Las mezclas B-10 y B-5 si presentan una ligera reducción de la generación de este gas, por su contenido de Biodiesel PME.
- La presencia del Monóxido de Carbono está asociada a la eficiencia de la combustión de un motor, así pues una mayor concentración de este gas indica una baja eficiencia de la combustión y viceversa.

Comparación de concentraciones de óxidos de nitrógeno (NOx) versus el tipo de combustible.

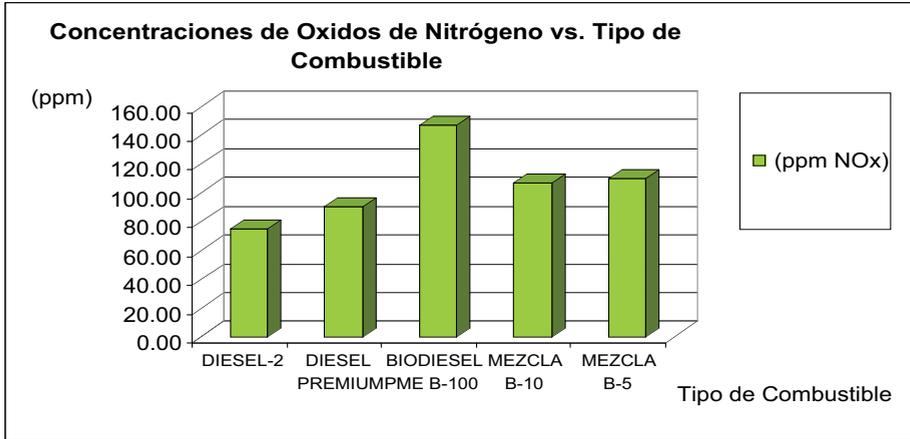


Figura 3. Óxidos de Nitrógeno versus el Tipo de Combustible.

- Se observa que las concentraciones promedio de los Óxidos de Nitrógeno (NOx) son diferentes entre cada tipo de combustible, siendo la más alta con el Biodiesel B-100 y la más baja con el Diesel-2.
- El Diesel Premium también presenta una menor cantidad de óxidos de nitrógeno.
- La mezclas B-10 y B-5 si presentan un ligero aumento de la generación de estos gases frente al Diesel-2 y Diesel Premium, por su contenido de Biodiesel PME al 10% y al 5%, respectivamente.

Comparación de concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) versus el tipo de Combustible.

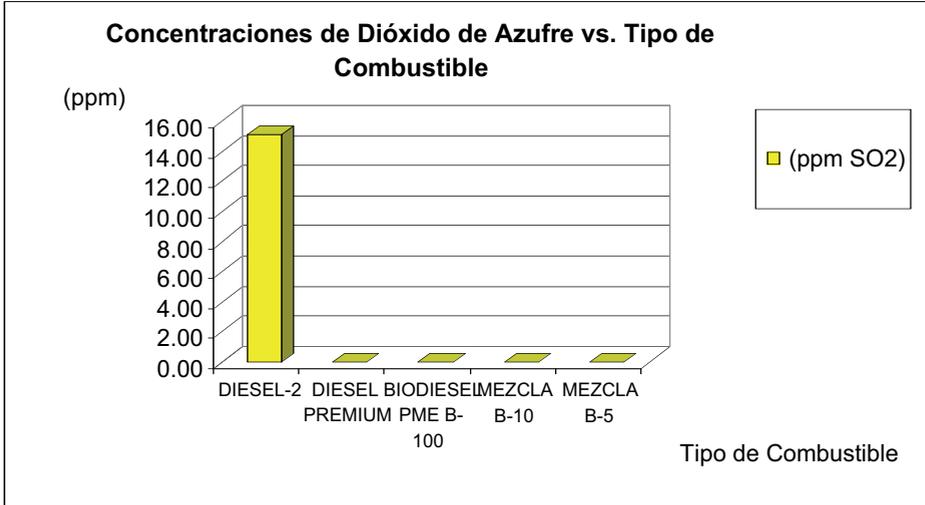


Figura 4. Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) versus el Tipo de Combustible

- Se observa que el único combustible que genera una concentración de este gas SO<sub>2</sub> es el Diesel-2, los demás combustibles no presentan emisiones de este parámetro.

Comparación de temperaturas de gases versus el tipo de combustible.

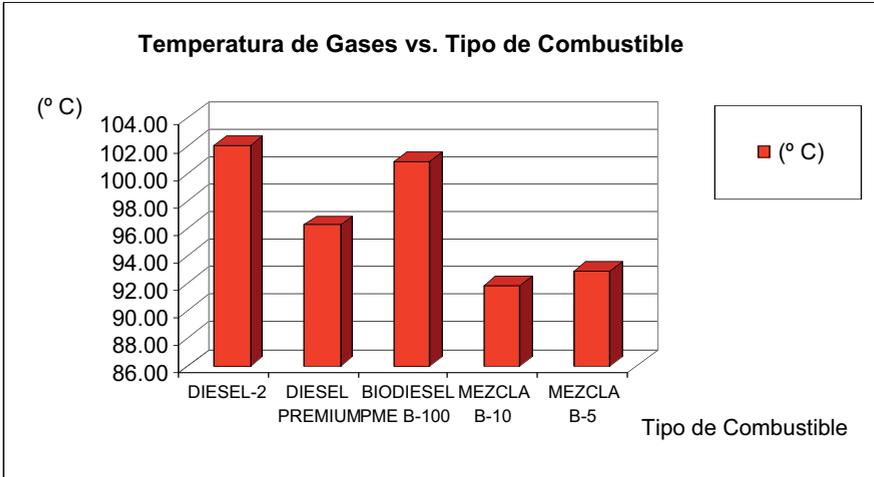


Figura 5. Temperatura de los Gases versus el Tipo de Combustible

- Se observa que las temperaturas de los gases con el Diesel-2 y con el Biodiesel son las mayores y relativamente son cercanas entre sí.
- La menor temperatura se presenta con la Mezcla B-10 y le sigue la Mezcla B-5.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Luego del análisis del proyecto, se concluye que la mezcla más idónea para la ciudad de Cuenca es B5 (Biodiesel PMA al 5% en Diesel Premium), ya que presenta las mejores características tanto de funcionamiento como en reducción de gases de escape a pesar de que se noto un ligero aumento en la concentración de NOx; es conveniente aclarar que todos los gases de escape medidos durante las pruebas están bajo la norma establecida.

A continuación se presentan las conclusiones más importantes del proyecto:

**Formación de Cristales.** Es una propiedad característica del biodiesel, la misma que se produce a medida que la temperatura decrece (Cloud Point) tendiendo a solidificarse, por esta razón se han visto afectados filtros de combustible y otros elementos del sistema de alimentación de combustible. Al utilizar B5, este cambio de estado es prácticamente nulo.

**Aumento de Potencia** utilizando B5 en las pruebas realizadas la potencia se incrementa ligeramente; debido a una combustión más eficiente, acusado directamente a un aporte extra de oxígeno contenido en el Biodiesel.

**Consumo.** Cuando se utiliza B5, el consumo de combustible se mantiene inalterable.

**Modificaciones en el Sistema** por tener un porcentaje bajo de Biodiesel (B5), no es necesario hacer ningún tipo de modificación, siempre y cuando el biocombustible utilizado cumpla con la norma ASTM D6751, utilizado en el proyecto.

**Emisiones Contaminantes.** Según las pruebas realizadas con B5 todos los contaminantes se reducen a excepción del  $\text{NO}_x$ , que aumenta levemente pero siempre dentro de la norma establecida, para superar este parámetro es necesario instalar en los tubos de escape catalizadores ó válvulas de recirculación de gases (EGR) con la finalidad de disminuir la temperatura de combustión evitando así que se produzcan los  $\text{NO}_x$ .

**En la ciudad de Cuenca.** Si se hubiera aplicado B5 durante todo el año 2008, hubiéramos alcanzado cifras importantes en reducción de gases contaminantes como los siguientes:

- Una disminución de 11.743,11 toneladas de  $\text{CO}_2$ , considerándolo como ciclo renovable, ó 6.294,3 (2,68%) toneladas de  $\text{CO}_2$  tomando solo la reducción que se midió en los equipos.
- Una disminución de 4,62 toneladas de material particulado (1,77%).
- Una disminución de 527,6 toneladas de hidrocarburos HC (80,87%).

- Una disminución de 495,75 toneladas de monóxido de carbono (4,47%).
- Por otro lado hubiera un incremento de 68,78 toneladas de NOx (6,59%), los cuales podrían ser controlados eficientemente con dispositivos anotados en el párrafo anterior.

\*En las pruebas realizadas durante el proyecto se notó que los gases contaminantes están dentro de la norma establecida, sin embargo el objetivo del proyecto no es mantener los gases nocivos en los límites permisibles, sino reducirlos de la forma más eficiente, de tal manera que este proyecto es un inicio del estudio sobre la reducción de las gases contaminantes provenientes de los vehículos motorizados.

## Bibliografía

ALLEY, Roberts

2001 *Manual del control de la calidad del aire*. Ed. McGraw-Hill, México.

ALONSO, Manuel

2001 *Técnica del automóvil Sistema de inyección de combustible en los Motores diesel*. Ed. Thompson, Madrid.

BOSCH, Robert

1996 *Manual de la técnica del automóvil*. Ed. Reverte, Barcelona.

DE NERVERS, Noel

1989 *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. Ed. McGraw-Hill. Madrid.

GARZÓN, Guillermo

2001 *Fundamentos de Química General*, segunda edición, McGraw-Hill. Barcelona.

GREG, Pahl

2005 *Biodiesel Growing a New Energy Economy*. Edit. Chelsea Green, EE.UU.

JOVAJ, M.

1982 *Motores del automóvil*. Edit. Mir. Moscow.

KEMP, William

2006 *Biodiesel basics and Beyond A Comprehensive Guide to production and Use for the Home and Farm*. Ed. Aztex Press, EE.UU.

OBERT, Edward

2001 *Motores de combustión Interna Análisis y aplicaciones*. Ed. Continental, México.

TICKELL, Josh

2006 *Biodiesel America How to Achieve Energy Security*. Ed. Published by Yorkshire Press.



# 7

## Obtención de biodiesel a partir de grasa bovina

Pablo Arévalo<sup>1</sup>, José Ulloa<sup>2</sup>, Servio Astudillo<sup>2</sup>

### 1. Introducción

El biodiesel es un combustible sustituto del gas oil para motores a diesel que se obtiene de materias primas agrícolas como aceites vegetales, residuos grasos de faenamiento de animales y que presenta ventajas frente al diesel derivado del petróleo ya que se obtiene a partir de fuentes renovables, como los aceites y grasas vegetales o animales de cualquier tipo.

La utilización del biodiesel lleva a un balance óptimo en el ciclo de carbono, evitando la acumulación de dióxido de carbono en el medio ambiente. Estas emisiones se reducen en comparación con el diesel, pero lo más relevante es su bajo contenido de azufre, por lo que se convierte en la mejor opción al ser usado como aditivo en el diesel para cumplir con las regulaciones ambientales que se van imponiendo cada vez en más países. Inclusive, hoy por hoy, en muchos países del mundo, existen legislaciones que imponen el uso obligatorio del biodiesel en mezcla con el gasoil.

En un sentido amplio, el biodiesel implica tres grupos diferentes de reacciones según un éster reacciona con un alcohol (transesterificación),

---

1 Director de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica Salesiana.

2 Docentes de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica Salesiana.

con un ácido carboxílico (acidólisis) o con otro éster (interesterificación). El presente trabajo de investigación comprende el estudio de la metanolisis de grasas para obtener ésteres metílicos de ácidos grasos. En este sentido los términos transesterificación o alcoholisis hacen referencia a este tipo de reacción.

La reacción de transesterificación de una grasa animal es aquella en la cual, una molécula de triglicéridos, componente mayoritario en una grasa, reacciona con un alcohol, generalmente ligero, bajo la acción de un catalizador, para producir una mezcla de ésteres de ácidos grasos y glicerina. Esta reacción de grasas animales con alcoholes ligeros consta de tres etapas consecutivas reversibles en las que el triglicérido es convertido consecutivamente en diglicéridos, monoglicéridos y glicerina.

La reacción de transesterificación de grasas animales con alcoholes ligeros se ha de llevar a cabo bajo la acción de un catalizador que puede ser homogéneo, tanto ácido como básico o heterogéneo, en este trabajo de investigación se utilizó un catalizador básico, el hidróxido de potasio. “Para el mecanismo de reacción bajo un catalizador básico el primer paso es la reacción entre el catalizador y el alcohol, para producir un alcóxido. El ataque nucleofílico del alcóxido sobre el grupo carbonilo del triglicérido genera un tetraedro como intermedio, del que se genera una molécula de éster de ácido graso y el correspondiente anión del diglicérido. El último paso es la desprotonación del catalizador regenerándose y reaccionando con otra molécula de alcohol y comenzando el ciclo. Los di y monoglicéridos son convertidos en una mezcla de ácidos grasos y glicerina por el mismo mecanismo descrito” (Montero, 2002-2003).

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Reactivos**

Los reactivos empleados en la elaboración del presente trabajo pueden clasificarse en tres grupos diferenciados: los reactivos para la síntesis de ésteres metílicos de ácidos grasos, el catalizador utilizado en dicha sín-

tesis, y por último, otros compuestos generales utilizados en la experimentación.

Los reactivos necesarios en la síntesis de ésteres metílicos incluyen al sebo que se obtuvo a través del proceso de fundición que separa los tejidos y elimina el agua de los residuos grasos de las tercenas de la ciudad, de manera artesanal. La composición de este sebo obtenido se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición del sebo después del proceso de fundición.

Componente	%
12-metil-ácido tridecanoico	2,94
Ácido pentanoico	1,17
9-ácido-hexadecenoico	2,00
14 metil ácido pentadecanoico	18,49
Ácido heptadecanoico	2,17
9-ácido octadecenoico	25,83
8-ácido octadecenoico	9,33
Ácido octadecanoico (ácido esteárico)	28,82

Otro reactivo es el metanol  $\text{CH}_3\text{OH}$ , que tiene un peso molecular de 32,04 g/mol, con una densidad relativa de 0,791% y una riqueza del 95%, presenta una temperatura de ebullición de 64,5°C y fue suministrado por los laboratorios Merck.

Los distintos experimentos se llevaron a cabo utilizando un catalizador básico, como es el hidróxido de potasio,  $\text{K}(\text{OH})$ , de un peso molecular de 56,11 g/mol y una riqueza del 90%, asimismo este insumo fue suministrado por los laboratorios Merck.

En el análisis por cromatografía de capa fina se ha utilizado hexano, éter dietílico, ácido acético glacial. Para la determinación del índice de acidez, se utiliza una solución etanólica de hidróxido de potasio, como reactivo valorante, previamente con hidrógeno aftalato de potasio como patrón primario y fenolftaleína como indicador.

## 2.2 Métodos utilizados

### 2.2.1 Análisis por Cromatografía de Capa Fina

El análisis por cromatografía de capa fina es el método analítico empleado para analizar las muestras de ésteres metílicos de ácidos grasos. Mediante esta técnica de análisis se puede determinar la presencia de ésteres metílicos de ácidos grasos. Las placas cromatográficas están hechas de aluminio cubiertas de gel de sílice, sus dimensiones son 25 x 3 cm de las cuales se han realizado recortes de 8 x 2 cm, tamaño suficiente como para poder analizar las muestras de ésteres metílicos.

Los reactivos utilizados para esta comatografía son Hexano con una riqueza del 85%, éter dietílico al 15%, y ácido acético glacial con una riqueza del 100%, todos esos insumos han sido facilitados por laboratorios Merck.

### 2.2.2 Índice de acidez y grado de acidez

Para llevar a cabo la determinación del índice de acidez o grado de acidez de los aceites vegetales empleados, se utiliza el método descrito en la norma ISO 660-1983 donde se define al índice de acidez como los miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de muestra. Y al grado de acidez como el porcentaje en peso de ácidos grasos libres.

## 2.3 Materiales

En la figura 1 se da a conocer el montaje experimental para llevar a cabo la reacción de transesterificación del sebo. Se utilizó un reactor discontinuo de vidrio, de forma cilíndrica, fondo plano y una capacidad instalada de 1 l asentado sobre un calentador y agitador magnético cuya función es facilitar el mezclado de los reactivos. En la tapa del reactor se disponen dos bocas, una para el acople de alimentación del metóxido y un controlador digital de temperatura y la segunda para la conexión al condensador que sirve para evitar los escapes de alcohol por evaporación.

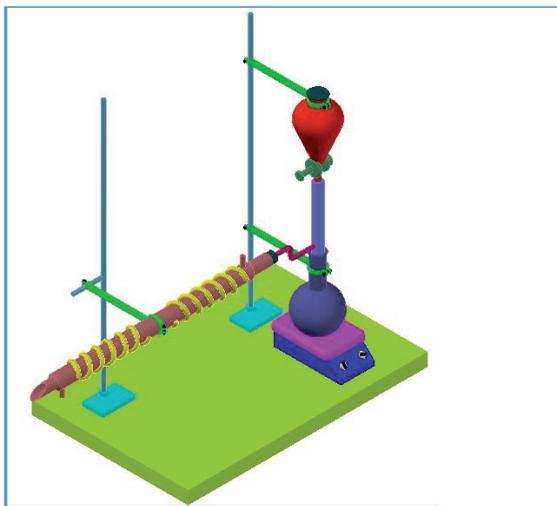


Figura 1. Montaje del reactor que incluye agitador magnético y calentador, balón de destilación, refrigerante, soportes metálicos y una termocupla para determinar la temperatura

## 2.4 Procedimiento para el estudio de la transesterificación de la grasa

Una vez montada la instalación experimental, se cargó la grasa en estado líquido en el reactor, fijando así la temperatura de reacción en el termómetro de contacto y se preparó la disolución del catalizador en metanol. Alcanzada la temperatura de reacción se conectó el refrigerante de reflujo y se puso en marcha el sistema de agitación. Finalmente se añadió al reactor la disolución de metóxido. Este será el inicio de cada experimento, es decir, tiempo cero.

Se dejó transcurrir el tiempo de reacción por una hora y se procedió a separar las fases obtenidas utilizando un embudo de separación, se determinó el pH y el volumen obtenido de la fase clara y se realizó el análisis de cromatografía de capa fina para comprobar la presencia de ésteres metílicos de ácidos grasos. Por último se recuperó el exceso de alcohol a través del proceso de destilación.

*Fases previas*

Se trata de una serie de experimentos cuyo objetivo es fijar la relación del catalizador con el alcohol metílico.

**2.4.1 Estudio de la influencia de la cantidad de catalizador**

El objetivo fundamental de esta etapa es determinar la cantidad mínima de hidróxido de potasio en la que se obtiene la conversión total hacia ésteres metílicos de ácidos grasos. Para obtener este valor se procede experimentalmente según la reacción de transesterificación, bajo una temperatura de 58°C, en un tiempo de reacción de 1 hora; los volúmenes de alcohol y de grasa son de 250 cc y 500 cc respectivamente, y la agitación debe darse a 1.000 rpm.

Se procedió a variar la cantidad de catalizador de 0,5 g obteniendo los resultados presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la fase 1.

CATALIZADOR	ESTER METÍLICO		Ph
2,0 g	568 cc	566 cc	7,0
2,5 g	600 cc	604 cc	7,1
3,0 g	550 cc	551 cc	7,4
3,5 g	582 cc	580 cc	7,5
4,0 g	544 cc	540 cc	7,8
4,5 g	548 cc	545 cc	7,9
5,0 g	531 cc	528 cc	8,0
5,5 g	554 cc	550 cc	9,3
6,0 g	500 cc	497 cc	11,4

Al realizar el análisis del modelo de regresión a utilizarse se estableció que el más conveniente era el determinado por la Ec. 1

Que dio el resultado presentado en la figura 2. Así, en esta fase se proyecta y considera como puntos a trabajar los valores de 2-2,5-3 gramos de catalizador.

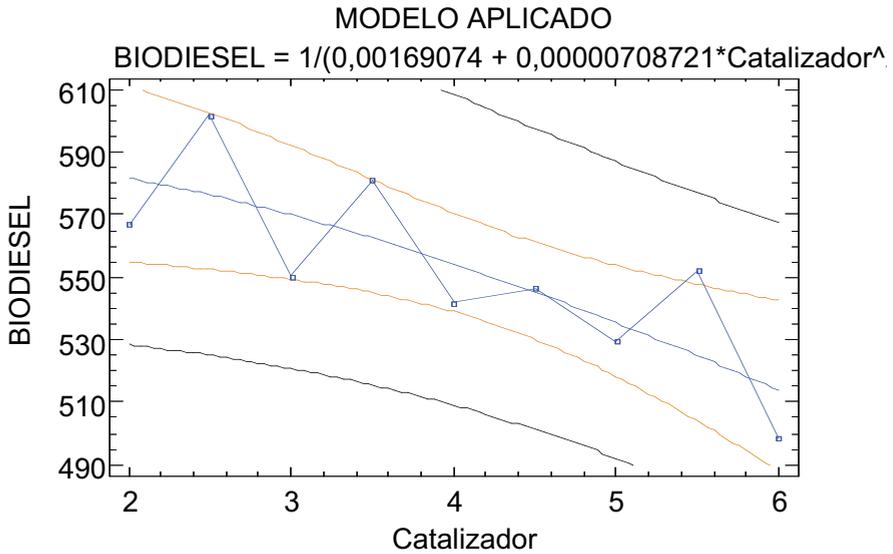


Figura 2. Modelo alcanzado

#### 2.4.2 Optimización de la reacción

El objetivo en esta segunda fase es la optimización de la reacción de ésteres metílicos, obtenidos a partir de grasa bovina en reactores discontinuos; para ello se ha empleado la metodología del diseño factorial de experimentos y superficies de respuesta.

Se inicia con la elección de la variable a medir que es rendimiento de la fase éster, en tanto por ciento en peso, a la hora de reacción además se determinan las variables de operación que son: temperatura y la concentración inicial de catalizador.

La velocidad de agitación se ha mantenido constante en todos y cada uno de los experimentos realizados, de forma que esta fuese elevada a 1.000 rpm para que no tengan lugar las posibles limitaciones de transfe-

rencia de materia en el medio de reacción, con lo que se eliminan los efectos de difusión, y la única etapa controlante es la reacción química. Así mismo, se han llevado a cabo los experimentos a presión atmosférica.

Además, se determinaron intervalos de operación para cada una de las variables de operación: se han elegido los intervalos de operación más convenientes, en función de la permisividad del equipo y los reactivos empleados. Los intervalos de operación propuestos son los que se muestran a continuación.

Las especificaciones de los reactivos empleados imponen las condiciones límite de operación para la temperatura de reacción. El límite superior se ha fijado en 60 °C ya que se trata de la temperatura de ebullición del metanol. El límite inferior se ha fijado en 56 °C.

La concentración inicial del catalizador en tanto por ciento en peso respecto a la cantidad de grasa empleada en los experimentos. En los datos bibliográficos no existe un óptimo en cuanto a concentración de catalizador se refiere, sin embargo, el límite inferior se encuentra en un 0,28 % en peso. Para el límite superior se considera un 0,43 % en peso.

La experimentación correspondiente a esta parte del trabajo, se ha planificado de acuerdo con las características de un diseño factorial de experimentos  $2^k$ , experimentos con puntos centrales. En la Tabla 3 se resumen los que se han tenido en cuenta, los valores de las variables y los resultados obtenidos para el rendimiento.

Tabla 3. Experimento correspondiente al diseño experimental

Temperatura	Concentración	Rendimiento
°c	% P/P	% P/P
58,0	0,36	85,7
58,0	0,36	86,7
58,0	0,36	85,7
58,0	0,36	86
56,0	0,28	81,1
60,0	0,43	78,6
60,0	0,28	80
56,0	0,43	78

Como se muestra en la figura 3, esto significa que el rendimiento de la reacción aumentó con la temperatura con una concentración alta pero disminuye cuando aumentamos la temperatura con una concentración menor.

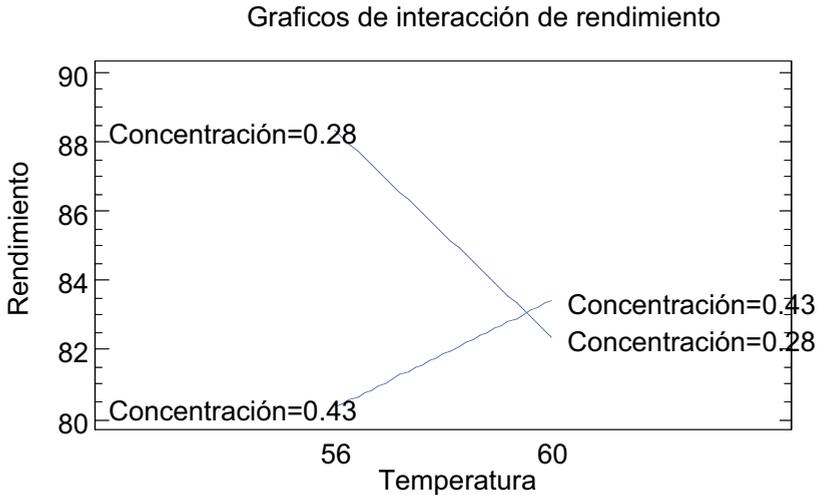


Figura 3. Interacción del rendimiento en función de la temperatura.

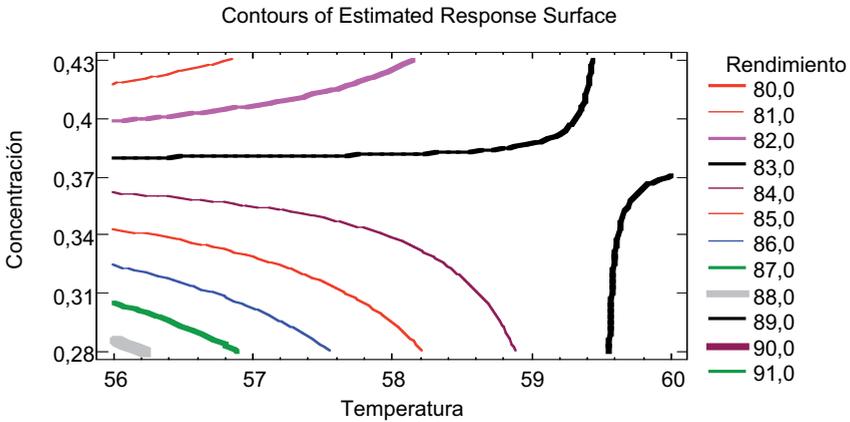
A través de la figura 4 se puede determinar que la temperatura apropiada está alrededor de 59°C y una concentración del 0,35-0,36 para alcanzar rendimientos alrededor del 90% (figura 1). Rendimiento de la reacción.

#### 2.4.3 Característica y funcionalidad del Biodiesel

En esta tercera fase, se procedió a determinar la composición del biodiesel que es la mezcla de ester metílico de ácidos grasos en un 96% (según el Informe de análisis del CIBAVI), además se determinaron ciertas propiedades del biodiesel comparándolas con las normativas internacionales, presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del Biodiesel

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	VALORES	
		GRASA	NORMA
Punto de inflamación	°C	134	>130
Viscosidad cinética	cSt a 40°C	4	1,9 -6
Poder calorífico	BTU/Lbs	16034	



Finalmente, se procedió a utilizar este combustible mezclando con el diesel en una relación de 5-10-20 % y se aplicó en un motor de diesel, el mismo que funcionó normalmente caracterizándose por humos de color blanco a diferencias de los humos de diesel de color oscuro. Posteriormente se analizaron las emisiones de combustión a través de un analizador de gases de marca, Ecoline 4.000, estableciéndose una disminución tanto en la emisión de  $\text{SO}_2$ , como de  $\text{CO}_2$  pero incrementando el porcentaje en  $\text{NO}_2$  conforme aumentaba la relación biodiesel-diesel. En las figuras 5 y 6 se muestra el comportamiento del  $\text{SO}_2$  y del  $\text{NO}_2$  respectivamente.

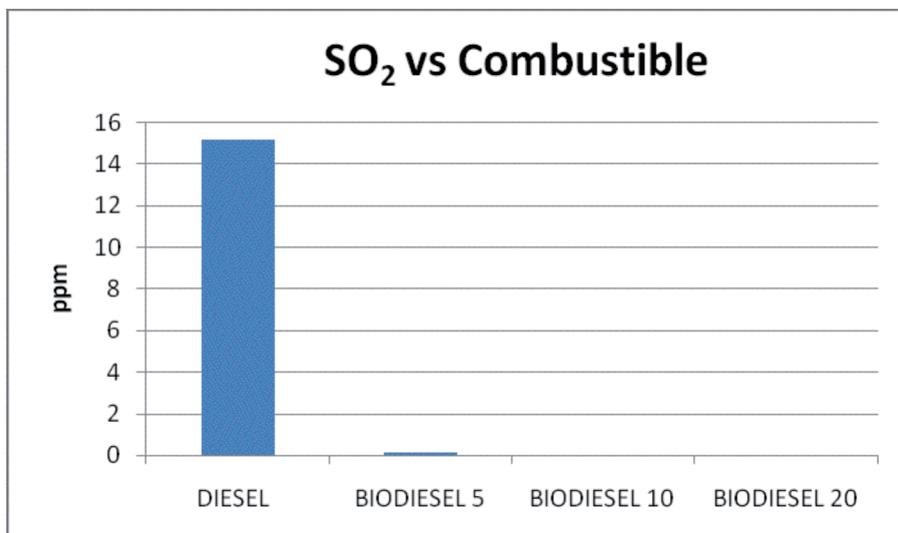


Fig.5 Comportamiento del SO<sub>2</sub> en función de la adición del biodiesel.

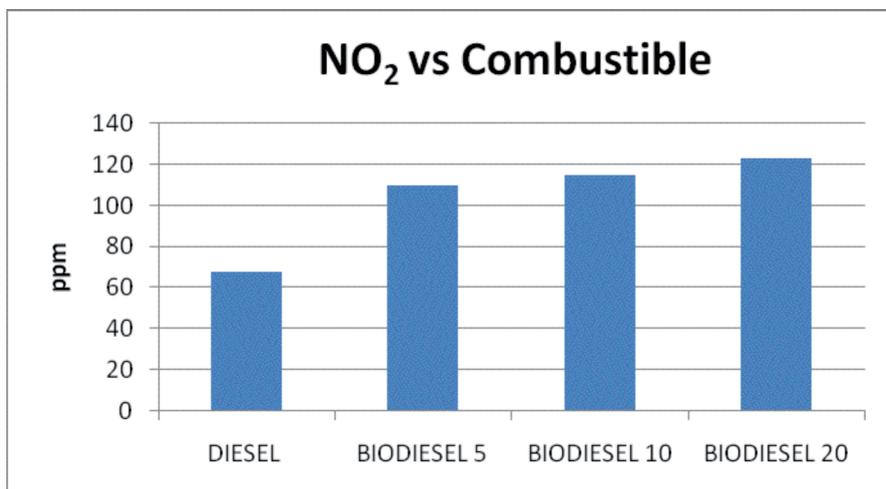


Fig.6 Comportamiento del NO<sub>2</sub> en función de la adición del biodiesel.

### 3. Resultados

Se observa experimentalmente que la conversión de triglicéridos es elevada a valores de catalizador entre 2 y 3 g considerando que con estos valores no se requiere de un proceso de separación ni lavados

De la optimización de la reacción, llevada a cabo mediante un diseño factorial de experimentos, en el que se estudió la influencia de la concentración inicial de catalizador y de la temperatura sobre el rendimiento de la reacción se determinó que la temperatura de reacción y la concentración de catalizador tienen un efecto negativo sobre el rendimiento de la fase éster secundaria de saponificación de triglicéridos.

Se consideran como óptimas las siguientes condiciones de operación ya que con ellas se obtiene un rendimiento entre 88 y el 90 % con una concentración de catalizador del 3,7 a 3,8 % a una temperatura de 58°C. Con esas condiciones no es necesario el proceso de lavado y purificación del biodiesel.

Se determinó que el biodiesel logrado cumple con los estándares internacionales y que disminuye las emisiones tanto de SO<sub>2</sub> como el CO<sub>2</sub> pero aumenta el NO<sub>2</sub>.

### Bibliografía

- ESCALONA, GARCÍA e HIDALGO  
1998 *Química Orgánica* ÁDs.I.\_Pentice Hall.
- GUTIÉRREZ Humberto, DE LA VARA Román  
2004 *Análisis y Diseño de Experimentos*, McGraw-Hill.
- MONTERO, Aliseda  
2002-2003 *Estudio de Transesterificación de aceite Vegetal con Metanol*ÁDLima. Escuela Superior de Escuelas Experimentales. 22-23.
- PEDRÓN, AGUDELO, S. JOHN: CANO  
2004 *Estudio Experimental De Las Variables Que Afectan la Reacción de Benjumea*, Scientia et Technica, No 24, Mayo, Vol. X. ISSN 0122-1701).
- SANZ, Cesareo  
1967 *Enciclopedia de la carne*, Espasa-Calpe S.A, Madrid.
- TEMPLETON  
1983 *Química Orgánica*, Paraninfo.

# 8

## Optimización de un prototipo para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua utilizando materiales existentes en el mercado nacional, aplicando normas internacionales

Fernando Vásquez Freire<sup>1</sup>, Jaime Omar Jordán Guillén<sup>2</sup>  
y Carlos Alfredo Zhigüi Loja<sup>3</sup>

### 1. Introducción

En la actualidad existe un enorme interés en la búsqueda de nuevas fuentes de energía. En este contexto la generación de hidrógeno a partir de electrólisis del agua, constituye una importante alternativa. Entre las ventajas del uso del hidrógeno como fuente de energía podemos señalar que en la combustión del hidrógeno genera como resultado agua, trabajando, de esta manera, en un ciclo ecológico cerrado; es decir, utilizando agua en la producción de hidrógeno y despidiendo agua en el ambiente. Por otra parte, el hidrógeno puede reemplazar a los combustibles fósiles adecuando la tecnología existente sin afectar a los componentes principales, pudiendo esto estar al alcance de todos.

Como parte del proyecto se ha diseñado y construido un prototipo de electrolizador, el cual consta de medidores de presión, medidores de

---

1 Director del Proyecto de investigación, Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

2 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

3 Egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

nivel de agua, medidor de temperatura, dosificador automático de agua, paro automático y manual, y un ciclo automático de control. Los elementos de medición y control garantizan la seguridad requerida al manejar hidrógeno a altas presiones.

A lo largo de la investigación fue observada una fuerte influencia de la corriente eléctrica en la cantidad de hidrógeno producido. Fue determinado además que el material de las placas y las características constructivas de las mismas provocan pérdidas de energía en el sistema por generación de calor. Los experimentos de electrólisis realizados fueron efectuados sobre el principio de obtener reproducibilidad en cualquier ambiente.

## 2. Materiales y métodos

### Materiales

Los materiales utilizados se presentan a continuación:

#### *Materiales usados en la construcción del prototipo*

- 1 tubo de acero inoxidable
- 4 tapas de acero inoxidable
- 4 tubos de acero inoxidable
- 4 pernos de acero inoxidable
- 1 recipiente de acero inoxidable
- 30 acoples de acero inoxidable
- 2 tubos de vidrio
- 2 manómetros en baño de glicerina
- 1 bomba de agua
- 1 presostato.
- 2 llaves de paso de acero inoxidable.
- 2 bornes de níquel con una pureza.
- 40 placas de níquel.
- 2 aislantes de teflón de 10mm.
- 2 aislantes de teflón.

- 1 lámina de polisulfona.
- 4 orines.
- 1 voltímetro de corriente continua.
- 1 amperímetro de corriente continua.
- 1 circuito eléctrico y electrónico de medición y control.

*Materiales usados en los experimentos preliminares de electrólisis:*

- 1 bandeja plástica de 1,5 litros.
- 11 litros de agua destilada.
- 5 kg de hidróxido de potasio (KOH).
- 2 electrodos de acero inoxidable AISI 316.
- 2 electrodos de níquel.
- 2 electrodos de platino.
- 2 cables de cobre # 16.
- 1 fuente de voltaje de corriente continua.
- 1 voltímetro.
- 1 amperímetro.
- 1 termómetro.

## Métodos

El proyecto de investigación consta de dos fases: la experimentación en el laboratorio para la determinación de la separación, el tamaño y la elección del material que cumplan con las especificaciones técnicas para la construcción de las placas, así mismo se procede a elegir el material adecuado para construcción de la cuba electrolítica y la concentración óptima del KOH en el agua; para lograr la mayor producción de hidrógeno.

Para las pruebas de laboratorio, fueron laminadas placas de acero inoxidable AISI 316, níquel y platino, las cuales fueron sometidas al proceso de electrólisis con diferentes concentraciones de hidróxido de potasio (KOH) al 5, 10, 15, 20, 25 y 30% en peso y agua como disolvente. Se trabajó además con voltajes entre 5-15 V y una separación entre placas entre de 1 y 10 mm, con el objetivo de determinar la influencia de estas variables en

la cantidad de hidrógeno producido. La sujeción de las placas fue llevada a cabo con pinzas de cobre con un baño de níquel y se las conectó en el centro del extremo superior de las mismas.

Sobre la base de los datos obtenidos en la experimentación de laboratorio fue llevada la segunda etapa de la investigación que consiste en la construcción del prototipo final para la producción de Hidrógeno, sobre el cual se realizaron pruebas para determinar la influencia de la presión y temperatura sobre el caudal producido.

### 3. Resultados

#### *Resultados de las pruebas de referencia*

Las pruebas se realizaron considerando las separaciones entre los electrodos, y la cantidad de KOH en agua destilada. Las curvas presentadas, muestran la mejor relación entre temperatura y amperaje, lo cual va en una estrecha relación con la producción de hidrógeno.

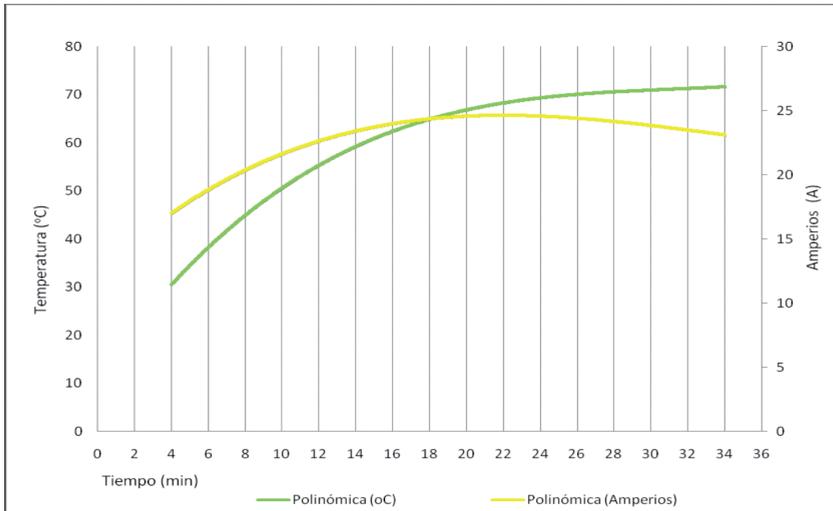


Figura 1. Relación de tiempo vs. temperatura y amperaje en el proceso de electrólisis en las pruebas de referencia en condiciones estandar de presión y temperatura correspondiente al electro de acero inoxidable

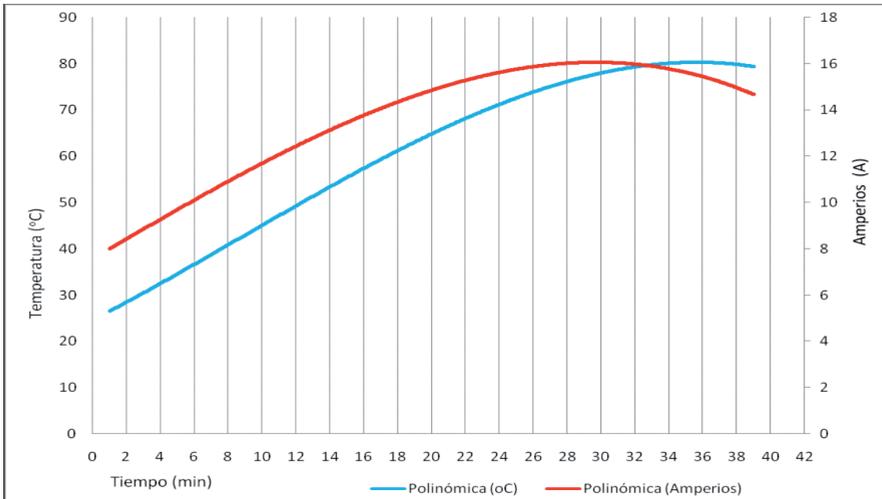


Figura 2. Relación de tiempo vs. temperatura y amperaje en el proceso de electrolisis en las pruebas de referencia en condiciones estandar de presión y temperatura correspondiente al electrodo de níquel

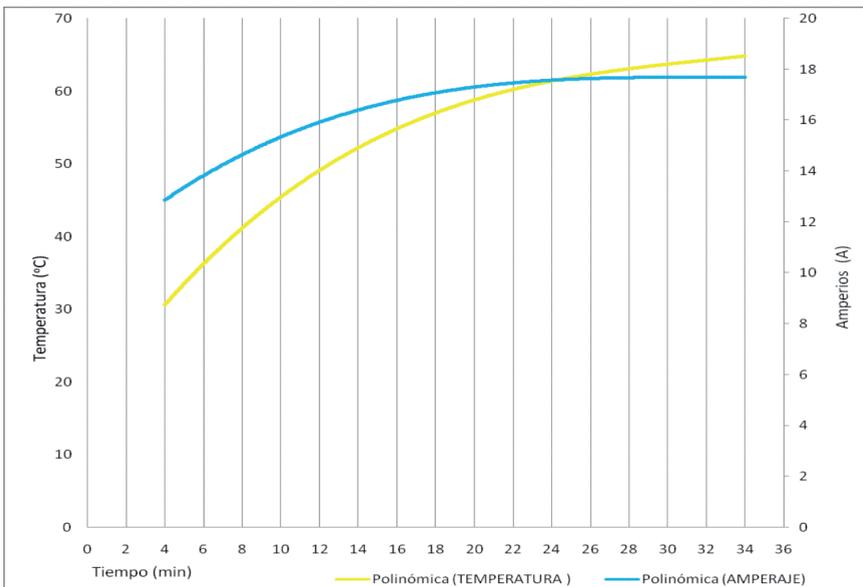


Figura 3. Relación de tiempo vs. temperatura y amperaje en el proceso de electrolisis en las pruebas de referencia en condiciones estandar de presión y temperatura correspondiente al electrodo de platino

Como se puede observar en las Figuras 1, 2 y 3, el mejor resultado se obtuvo con la lámina de níquel, ya que produce mayor cantidad de hidrógeno manteniendo un consumo de energía menor que las otras dos láminas ensayadas en la práctica de laboratorio.

La concentración adecuada de KOH fue del 30% en peso diluido en agua desmineralizada.

### **Resultados del Prototipo Final**

El prototipo construido es capaz de producir 4,32 l/s de hidrógeno almacenándolo a una presión de 80 PSI en la cuba electrolítica y una temperatura de funcionamiento máxima de 60°C, sin riesgos de fugas de gas.

Las placas para los electrodos del prototipo fueron construidas de níquel, sumergidas en agua desmineralizada con un pH de 6,5 y con una concentración del 30 % en peso de KOH.

La cuba electrolítica y las cañerías fueron construidas en acero inoxidable.

Además, el prototipo cuenta con los siguientes dispositivos de seguridad: medidores de presión, medidores de nivel de agua, medidor de temperatura, dosificador de agua, paro de emergencia. Todos estos con sus respectivas etapas de control automáticas.

### **Discusión de resultados**

- Debido a que el electrolizador consume agua para generar hidrógeno, se debe tomar en cuenta una bomba para dosificar constantemente agua en el interior del electrolizador.
- La generación de calor es inevitable en la producción de hidrógeno, por tal motivo se debe implementar un sistema de enfriamiento.
- Si se desea tener Hidrógeno con una pureza elevada, de tal forma que no se tenga que entrar en una etapa de purificación previa al embasamiento en algún recipiente, se debe utilizar un sistema de lavado de KOH.

- Para asegurar una larga vida de las placas se deberá utilizar agua totalmente desmineralizada.
- Para evitar peligros de incendios o explosiones por acumulación de gas hidrógeno debido a fugas del mismo, se debe trabajar en un ambiente que asegure una buena circulación de aire.
- En caso de contacto de la solución electrolítica con alguna parte del cuerpo, se debe neutralizar la misma con aplicación de vinagre.

#### 4. Conclusiones

- Se puede concluir que al finalizar la investigación, se cuenta con un prototipo elemental para generar hidrógeno optimizado, además construido con materiales y elementos existentes en nuestro medio.
- Se concluye que esta investigación abre un camino a una nueva forma de energía en el Ecuador desarrollada y mantenida con mano de obra de ecuatorianas/os y, además la investigación respeta los objetivos de nuestros ancestros que siempre fue la conservación y respeto de la naturaleza.

#### Bibliografía

Varios Autores, editado por Nicolas Alonso-Vante

2003 *Electroquímica y Electrocatálisis*, Volumen 1b, Primera Edición Virtual e-libro.net, Buenos Aires, Mayo.

Varios Autores, editado por Nicolas Alonso-Vante

2003 *Electroquímica y Electrocatálisis*, Volumen 1a, Primera Edición Virtual e-libro.net, Buenos Aires, Mayo.



# 9

## Diseño de un prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor de abastecimiento de agua para irrigación

Fran Reinoso<sup>1</sup>, Augusto Bustamante<sup>2</sup>, Manuel Quezada<sup>2</sup>

### 1. Introducción

A pesar que en Ecuador se ha venido empujando la difusión de las tecnologías de energías renovables desde la década de los ochenta y, de que en la actualidad existen esfuerzos del Ministerio de Energía y Minas con fondos propios o del Banco Mundial, ONG, universidades y aun de empresas privadas, no se puede decir que éstas se encuentren difundidas y contribuyendo de manera significativa al mejoramiento de la calidad de vida de la población rural. La hidroelectricidad es la energía renovable más difundida en el Ecuador y su potencial es aún poco explotado; razón por la cual, cada vez es más necesario integrar decididamente fuentes de energía limpias y renovables, que por sus ventajas sean un sustituto a formas de energías que día a día van escaseando y tienen un impacto ambiental negativo global, como aquellas desarrolladas a partir de los hidrocarburos.

El bombeo de agua y la energía renovable son socios naturalmente compatibles que pueden crear soluciones económicas para cualquier aplicación de bombeo y transporte de agua, ya sea para consumo humano o

---

1 Director del Proyecto de Investigación, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Ecuador.

2 Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Ecuador

riego. La fuerza que mueve el equipo de bombeo, que es una rueda hidráulica por ariete hidráulico, es definitivamente un arroyo, un canal u otra forma de corriente de agua que pueda suministrar la energía suficiente para bombear a alturas superiores; de igual manera el viento es otro medio, que proporciona la fuerza necesaria para que sistemas de bombeo eólico operen.

En el mismo sentido, la actividad agropecuaria en el Ecuador sin vías expeditas, sin servicios de transferencia tecnológica, sin capacidad de valor agregado y sin capacitación; no logrará el impulso necesario para mejorar sus niveles de participación en el producto interno bruto del país, ni tampoco alcanzará niveles de competitividad nacional e internacional.

En este contexto; el riego viene a ser el factor técnico preponderante para el desarrollo de la agricultura, por lo que es una necesidad implementar sistemas eficientes para conseguir que el sector agroindustrial se convierta en un polo de desarrollo socioeconómico del país. Uno de los factores principales que limita la actividad productiva del sector rural, es por un lado, la falta de sistemas de riego técnicamente implementados; y, por otro, el costo de operación de los sistemas de bombeo de agua convencionales usados generalmente, lo que ocasiona un incremento en los costos de producción. Sumado a esto, en la zona sur del país y en particular en la provincia del Azuay, aproximadamente el 60% de terrenos cultivables tienen una pendiente no menor a 40°, haciendo que las actividades productivas sean cada vez menos rentables, lo que conlleva al abandono del campo.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Análisis de la zona de estudio para el dimensionado del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico**

Se procede a identificar las instituciones y organizaciones relacionadas con la agricultura y el riego en la región austral del país. En vista de que la información técnica obtenida es insuficiente para poder estandarizar y definir los datos de partida para el diseño del prototipo de bomba de arie-

te hidráulico, se ha optado por la alternativa de definir una zona específica para el estudio del proyecto.

Aprovechando que paralelamente se desarrolla un proyecto para el cultivo de hortalizas y otros productos en zonas con grandes pendientes, precisamente en los predios de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Yumacay de Paute, y en vista de la presente necesidad de riego y análisis de los requisitos indispensables como: zona de cultivo, un caudal firme de agua y salto hidráulico aprovechable para garantizar la sostenibilidad en el tiempo de los cultivos. Yumacay viene a constituirse en una alternativa viable para el desarrollo del proyecto de investigación, la planimetría de la zona se muestra en la figura 1.

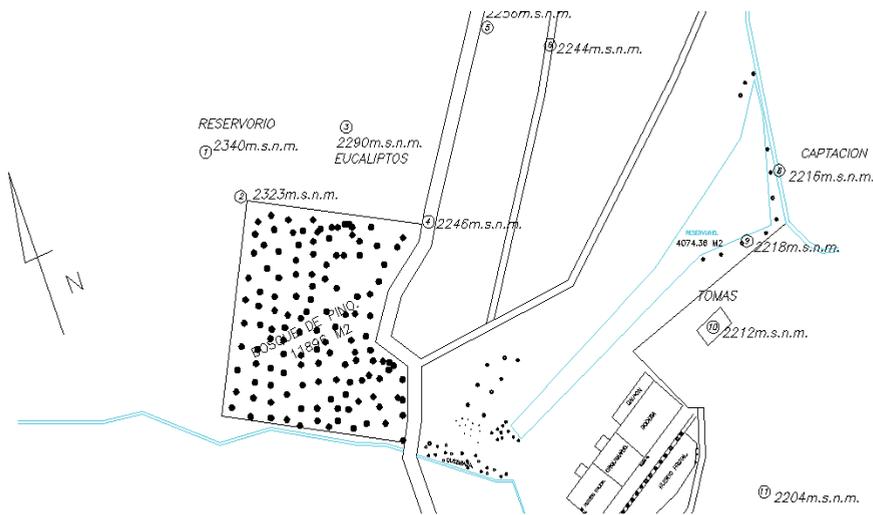


Figura 1. Planimetría de la zona de Yumacay - Paute

La zona de Yumacay dispone 10 hectáreas de terrenos para ser cultivados, con pendientes de aproximadamente del  $40^\circ$  y alturas entre 50 y 150 m sobre el nivel de la captación de agua, de aproximadamente  $40.000 \text{ m}^3$  construido en la parte baja de la zona en estudio, el embalse está alimentado por la quebrada Yumacay.

## 2.2 Determinación de alturas y caudal instalado de la zona de estudio

Se procede a realizar mediciones preliminares de altura y longitudes de emplazamiento en todas las inmediaciones del sitio seleccionado, aguas arriba y aguas abajo del embalse existente, volumen y captación de agua, área de cultivo, sitio de emplazamiento posible del sistema y otros. Para el efecto se utilizó el método de determinación de hitos mediante GPS (*Global Position System*), para la determinación de longitudes se utilizaron además cintas métricas y flexómetros; concluyendo con la elaboración de una planimetría de la zona Yumacay, mostrada en la figura 1.

Para la determinación del caudal instalado se utilizó un método de medición volumétrico, instalando aguas arriba del embalse un vertedero metálico triangular de 90° (ver figura 2) con el objeto de realizar el aforo de caudal en la quebrada Yumacay, en el mismo que se han monitoreando los valores de caudal y posibilitó definir los datos de partida para el diseño (Q, H) del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor.



Figura 2. Medición del caudal de quebrada Yumacay- Vertedero Triangular de 90°

De esta forma se determinó que la altura aprovechable, también conocida como salto hidráulico es de 12 m, superando así las expectativas de diseño que son de 3 a 5 m, se determina una altura de descarga de 120 m, una distancia de bombeo 760 m y finalmente una distancia de alimentación 30 m superando también los valores de diseño que son de 6 a 12 m.

El aforo del caudal de la quebrada Yumacay realizada durante doce meses durante el año 2007, de cuatro mediciones por mes, con la técnica de vertedero triangular, para obtener una hidrógrafa anual del año 2007 como se muestra en la figura 3.

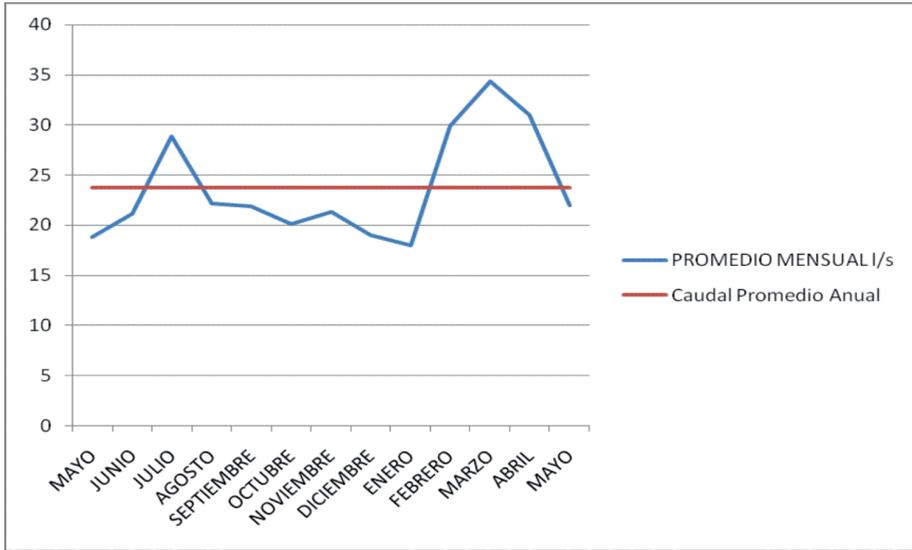


Figura 3. Hidrógrafa Anual 2007 - Quebrada Yumacay, los valores máximos en crecida son de 34 [l/s], y los mínimos en época de estiaje son de 17 [l/s]

Con estos datos se calculó que el caudal promedio es de aproximadamente 23 l/s; para la operación del ariete hidráulico se requieren 5 l/s que significa únicamente el 30 % del caudal instalado.

## 2.3 Diseño hidráulico y mecánico del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor

### 2.3.1 El procedimiento de cálculo

Con los datos de partida reales de alturas de bombeo y caudal aprovechable; se realiza una investigación bibliográfica exhaustiva para establecer el procedimiento de cálculo idóneo, que permita definir los diferentes

parámetros hidráulicos que intervienen en la operación del prototipo de bomba de ariete hidráulico, así como las dimensiones generales para su construcción. Con la intención de agilizar el análisis, se sistematizó mediante software (Excel) el proceso de cálculo y dimensionado de la bomba de ariete hidráulico multipulsor.

El dimensionado de la bomba de ariete hidráulico multipulsor, se ha desarrollado a partir de los lineamientos del procedimiento de cálculo a detalle establecido de la bibliografía recomendada, obteniéndose una longitud de tubería de impulsión de 30 m, un ángulo de inclinación de  $10^\circ$ , la velocidad de flujo en la tubería de alimentación es de 2,29 m/s, el diámetro de entrada del aceite es de 50,8 mm, y el caudal circulante calculado fue de  $0,004639 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Acercas del diámetro de la válvula check, de descarga y, de la cámara de aire, fueron de 1, 1 y 3 pulgadas respectivamente; la altura de cámara de aire fue de 10 pulgadas. El número de Reynolds fue de 102045,61 que indicaba un régimen turbulento, la rugosidad relativa se determinó en 333,33 y el factor de fricción fue de 0,0322.

Las pérdidas por fricción en la tubería de alimentación fueron de 5,33 m, el diámetro del eje de la válvula de impulsión se calculó en 8 mm, con un área de derrame total de  $5,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . La velocidad de salida de las válvulas fue de 1,44 m/s con un ciclo de duración de 1 s en el que se bombeaba un caudal de  $3,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Los cálculos determinaron que la presión dinámica fue de 1036,8 Pa, el pulso de Zhukovsky de 1,84 MPa, con presión máxima y mínima de 1,88 MPa y 1,78 MPa, con una sobrepresión de 187,88 m. Así, la celeridad de onda de presión fue de 1274,55 m/s, el tiempo de cierre de la válvula fue de 0,047 s, y el coeficiente de arrastre de la válvula de impulsión de 32,8.

En cuanto a la válvula de impulsión su peso fue de 1,05 kg, su coeficiente de arrastre fue de 32,8, soportando una fuerza hidráulica de 4,23 kg. El volumen total de la cámara de aire fue de  $6,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  que soporta una presión antes del choque hidráulico de 1,08 MPa.

En la cámara de aire, se determinó que el volumen total de agua fue de  $2,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  con un volumen de aire inicial y final de  $3,64 \times 10^{-3}$  y  $3,72 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  respectivamente, la presión soportada fue de 1,09 MPa.

En lo que se refiere al conducto vertical, se calcula una velocidad de 0,806 [m/s], donde el número de Reynolds fue de 13468 generándose también un régimen turbulento, con una rugosidad relativa de 63500, y pérdidas inerciales de 8,21 m. El factor de fricción de la tubería de descarga fue de 0,0286.

Con estos parámetros calculados, el ariete desarrolla una altura mínima de 113,18 m, con una eficiencia de bomba del 19%, y un rendimiento volumétrico del 0,844%.

### 2.3.2 El proceso de diseño mecánico

Basándonos en los resultados obtenidos del proceso de cálculo, se realiza el dibujo técnico (plano de conjunto y particulares) del Prototipo de Bomba de Ariete Hidráulico, utilizando el Software de diseño mecánico Inventor Auto Desk. El esquema del prototipo se muestra en la figura 4.

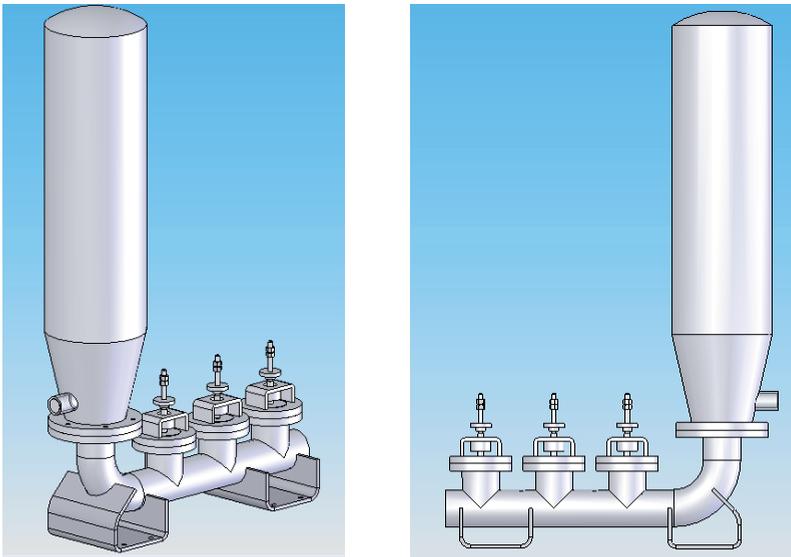


Figura 4. Perspectiva de Prototipo de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor

Los resultados del proceso de modelado del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor, permitieron la comprobación de resultados del proceso de cálculo antes de su construcción; en lo referente a definir presiones totales, presiones dinámicas sobre las válvulas y velocidades del flujo en los diferentes elementos de la bomba. Los valores se muestran a en la Tabla 1:

Tabla 1. Datos comparativos de proceso de modelado

Ítem	Descripción/variable	Valor (Pa, m/s)	Valores de diseño (Pa, m/s)
01	Presión estática cámara de aire	0,42 MPa	1,09 MPa
02	Presión dinámica válvulas de impulsión	1000 Pa	1036,8 Pa
03	Velocidad en la cámara de aire	0,24 m/s	-
04	Velocidad en válvula de impuso	1,49 m/s	1,44 m/s
05	Velocidad en la brida de entrada	2,48 m/s	2,29 m/s
06	Velocidad en brida de descarga	1,24 m/s	1,66 m/s

### 2.3.2 El modelado hidráulico

Para tener una primera aproximación del comportamiento mecánico e hidráulico del prototipo de ariete hidráulico, antes de materializarlo en su construcción; fue necesario realizar el modelado de la operación en lo referente a presiones y velocidades del flujo; para el efecto se utilizó el software Cosmos Flow Auto DesK, las figuras 5, 6, y 7 muestran como éste software ofrece el modelo hidráulico, el diagrama de presiones dinámicas y el diagrama de las velocidades en la cámara de aire del ariete hidráulico.

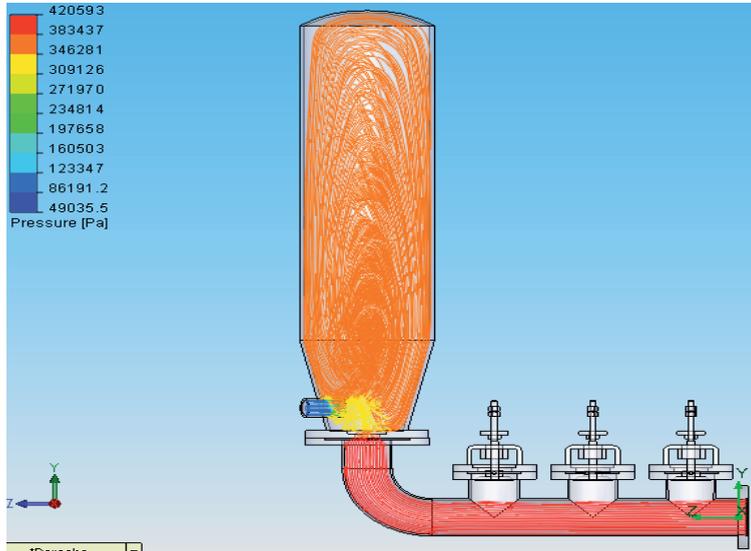


Figura 5. Modelado hidráulico de prototipo de Ariete Hidráulico-Presiones

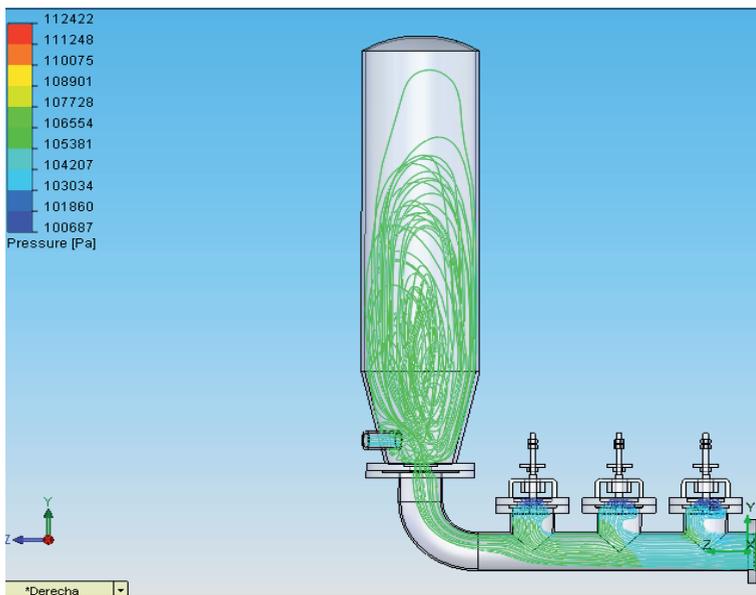


Figura 6. Diagrama de presiones dinámicas de cámara de aire de Ariete Hidráulico

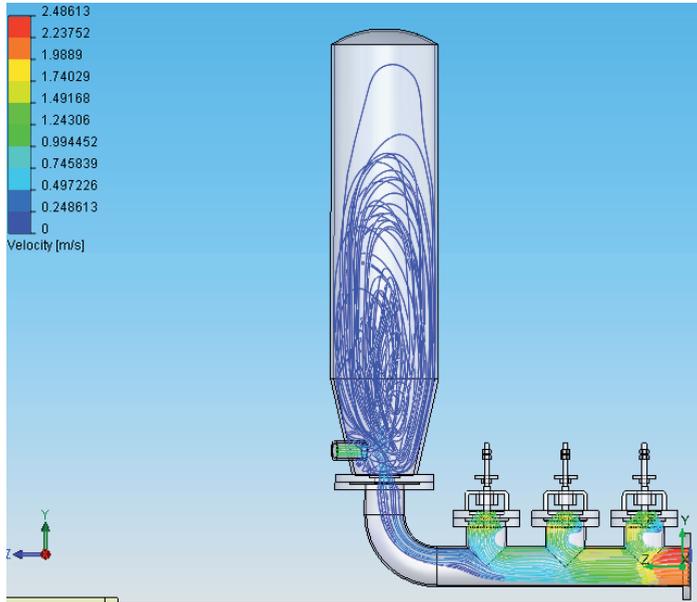


Figura 7. Diagrama de velocidades de cámara de aire de Ariete Hidráulico

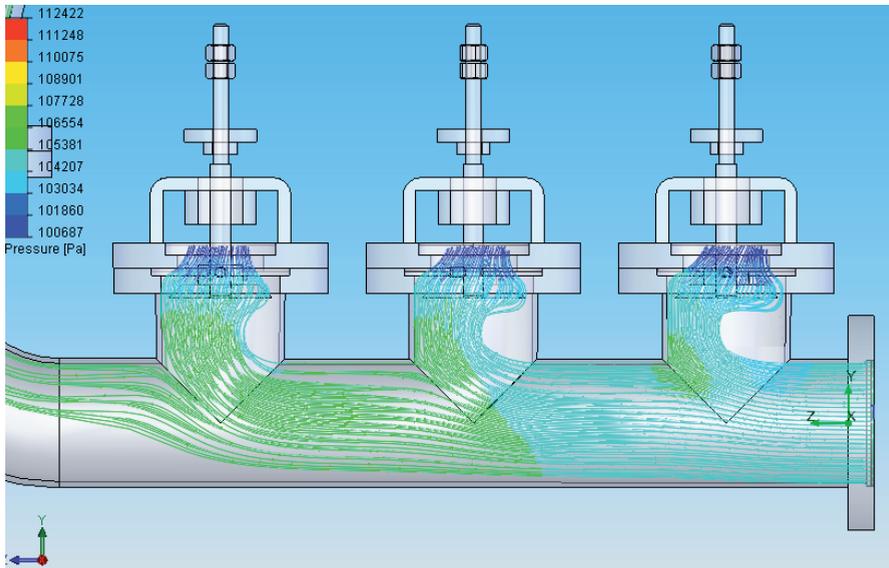


Figura 8. Diagrama de presiones dinámicas de válvulas de impulso de Ariete Hidráulico

Las figuras 8 y 9 muestran los diagramas de presiones dinámicas y de velocidades en las válvulas de impulso de ariete hidráulico en detalle. Como se puede apreciar, la presión de salida aumenta decididamente al final de la tubería de las válvulas.

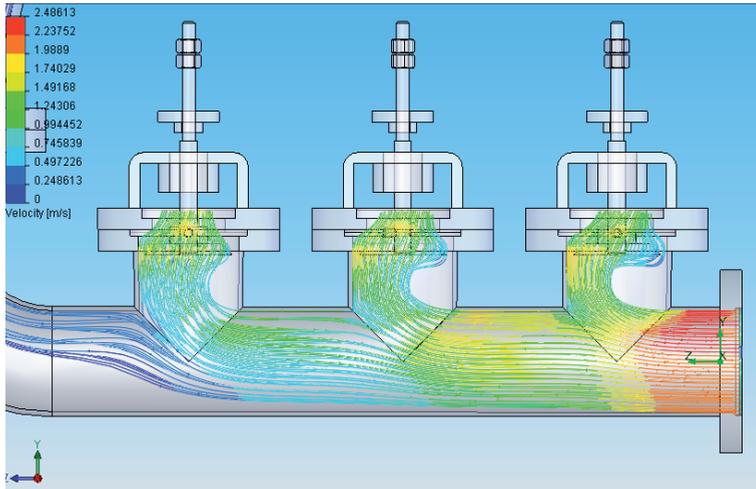


Figura 9. Diagrama de velocidades en válvulas de impulso de Ariete Hidráulico

## 2.4 Construcción del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor

La construcción del prototipo de bomba de ariete hidráulico, se llevó a cabo en su totalidad en los laboratorios de la Facultad de Ingenierías de la UPS-Cuenca (ver figura 10); este proceso involucró actividades como la adquisición y empleo de materiales económicos existentes en el medio, de los cuales se mencionan tubos galvanizados de acero de diámetro de 2'' x 500 mm y 5'' x 600 mm, tres Ac. de transmisión galvanizado de diámetro 4'' x 20 mm y dos de 8'' x 30 mm, cuatro Ac. inoxidables de diámetro 1 \_ '' x 30 mm y tres de 3/8'' x 100 mm, cuatro bronce forsfóricos de 1'' x 50 [mm] de diámetro y una platina galvanizada de 5'' x 3'' x 500 mm.

Además, se incluyen de 30 barras de plomo de 140 g para pesa, válvula e impulso, una balanza electrónica de capacidad 2 kg, y un cronómetro digital. El proceso de construcción incluye el mecanizado de particulares, el tratamiento superficial de galvanizado, el montaje y puesta a punto (control de estanqueidad de válvulas).



Figura 10. Proceso de construcción de prototipo de Ariete Hidráulico

## 2.5 Diseño y construcción del banco de pruebas de Golpe de Ariete

En un primer momento, se realiza la construcción de partes y adecuaciones mecánicas del banco para pruebas de golpe de ariete (ver figura 11); utilizando partes del equipo existente (tanque hidrodinámico) en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos del la Carrera de Ingeniería Mecánica de la UPS, Sede Cuenca. El banco de pruebas consta de dos tanques plásticos de 1 m<sup>3</sup>, un tanque plástico de 500 cm<sup>3</sup>, doce metros de tubería galvanizada de 2'' de diámetro, treinta metros de tubería de PVC de diámetro

de 1/2", dos manómetros con capacidad de 0 a 20 bares, dos pares de válvulas esféricas de 2" y 1" pulgadas, una válvula de aguja de 1/2", un canal vertedero, una bomba centrífuga con caudal de 50 l/min, un motor trifásico de 2 hp y 1740 rpm y por último un relé térmico de 220 V y 10 A.

Al mismo tiempo, se ha realizado la automatización completa de dicho banco de pruebas; con lo cual es posible controlar y medir las diferentes variables como: caudal, presión y revoluciones del motor de la bomba.



Figura 11. Banco para Pruebas de Golpe de Ariete- Tanque Hidrodinámico

Luego de las pruebas de operación y debido a la imposibilidad de manejar de manera independiente las variables de caudal, altura y la estabilidad en la operación de la bomba de ariete hidráulico; se realiza variantes al banco de pruebas desarrollando un nuevo diseño, manejando las condicionantes anteriores; para lo cual se construye un depósito de una

capacidad y salto hidráulico determinado, se instalan los instrumentos y dispositivos para la medición del caudal y altura de operación; y además, se cuenta con un sistema cerrado de bombeo par garantizar la operación permanente del sistema, tal como se muestra en la figura 12.



Figura 12. Banco para Pruebas de Bomba de Ariete Hidráulico

## **2.6 Determinación de las características de funcionamiento del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor**

En esta etapa final de la investigación, se pretende obtener las curvas características de comportamiento de la bomba de ariete hidráulico multipulsor (ver figura 13); principalmente la curva motriz caudal-altura ( $H-Q$ ) y la curva de rendimiento ( $1/2-Q$ ), en diferentes condiciones de operación; esto significa, la determinación de las características de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico operando con una, dos y tres válvulas de impulso.

Para el efecto, se utilizó el método de regulación a la descarga, mediante una válvula de aguja colocada en la tubería de impulsión, con la cual a diferentes aperturas de la válvula se obtuvieron los valores de altura y caudal. La altura o presión de descarga  $H$  se mide mediante un manómetro instalado en la cámara de aire de la bomba de Ariete Hidráulico y para la medición del caudal  $Q$ , se emplea un canal abierto y vertedero triangular.



Figura 13. Banco para pruebas de bomba de ariete hidráulico multipulsor

Para garantizar la operación continua del banco de pruebas, se dispone de un reservorio de purgas, conectado al reservorio mediante un circuito cerrado de bombeo, en donde se recolecta el volumen de agua desalojado en la etapa de impulso de la bomba de ariete hidráulico y el caudal de entrega de la misma. Al mismo tiempo se garantiza de esta manera mantener un salto hidráulico  $H$  constante durante el desarrollo de las diferentes pruebas.

El proceso de ejecución de pruebas de laboratorio de la bomba de ariete hidráulico, contempla la obtención de la curva motriz Altura - Caudal (H-Q) de la Bomba de Ariete para una, dos y tres válvulas. El esquema de la instalación utilizado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca; para la ejecución de las pruebas de operación mencionadas anteriormente, se muestra en la figura 14.

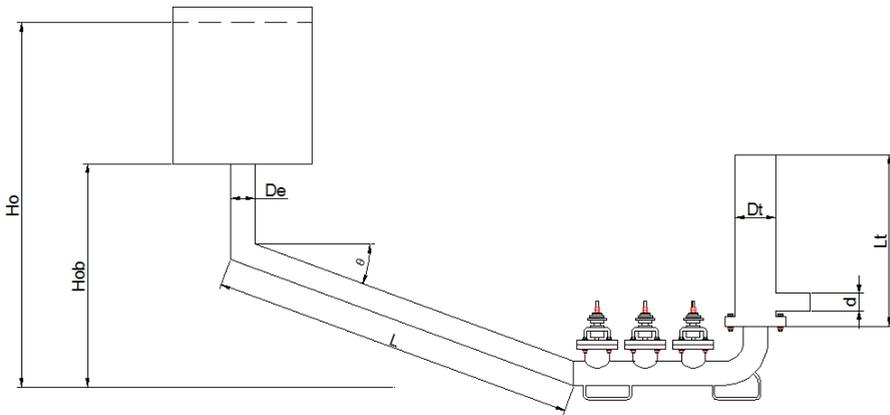


Figura 14. Esquema de instalación de banco de pruebas de ariete hidráulico

Las variables principales de entrada para el análisis y la obtención de las curvas de operación de la bomba se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Variable de entrada de banco de pruebas de ariete hidráulico

Descripción/variable	Símbolo	Dimensión
Altura desde la bomba hasta la superficie del agua.	Ho	3 metros
Altura desde la bomba hasta la base del tanque.	Hob	2 metros
Largo de la tubería.	L	6 metros
Diámetro de la cámara de aire.	Dt	5 pulgadas
Ángulo de inclinación de la tubería.	q	30 °
Diámetro tubería de descarga.	D	1/2 pulgada
Altura de cámara de aire.	Lt	0,46 metros
Diámetro de tubería de entrada.	De	2 pulgadas

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos para el ensayo hecho a la bomba de ariete hidráulico, con un peso de 1.400 g y una carrera de 3 mm:

Tabla 3. Datos de Curva H – Q de la bomba de ariete para una válvula

MEDICIÓN	CAUDAL (Q) [lt/s]	PRESIÓN (P) [bar]	PULSOS [n/s]
1	0	4,2	0
2	0,1092557	2,7	0,004
3	0,1638836	2	0,009
4	0,1969635	1,5	0,013
5	0,2185114	1	0,016
6	0,2443032	0,2	0,02

Tabla 4. Datos de Curva H - Q de la bomba de ariete para dos válvulas.

MEDICIÓN	CAUDAL (Q) [lt/s]	PRESIÓN (P) [bar]	PULSOS [n/s]
1	0	12,3	0
2	0,1221516	8,5	0,005
3	0,1445317	7,41	0,007
4	0,1545109	6,8	0,008
5	0,1727484	5,38	0,01
6	0,2043987	3,04	0,014
7	0,2443032	0	0,02

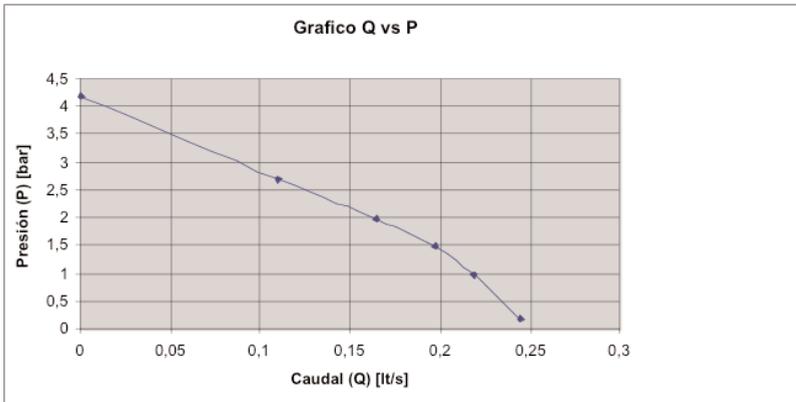


Figura 15. Curva característica motriz H-Q de la bomba de ariete hidráulico con una válvula de impulso

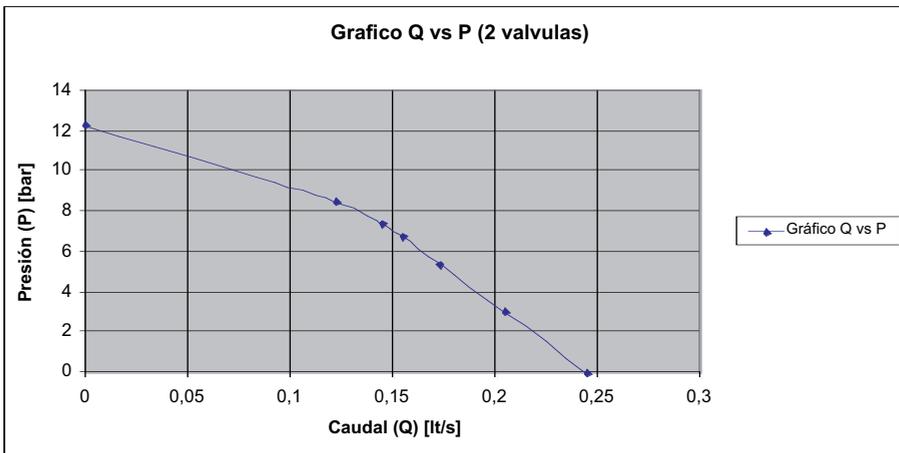


Figura 16. Curva característica motriz H-Q de la bomba de ariete hidráulico, 2 válvulas de impulso

Tabla 5. Datos de Curva H - Q de la bomba de ariete para tres válvulas.

MEDICIÓN	CAUDAL (Q) [m3/s]	PRESIÓN (P) [bar]	PULSOS [n/s]
1	0	13,5	0
2	0,1221516	8	0,005
3	0,1545109	6,5	0,008
4	0,1727484	5,5	0,01
5	0,1811801	4,5	0,011
6	0,1892364	4	0,012
7	0,2043987	2	0,014
8	0,2115728	0	0,015

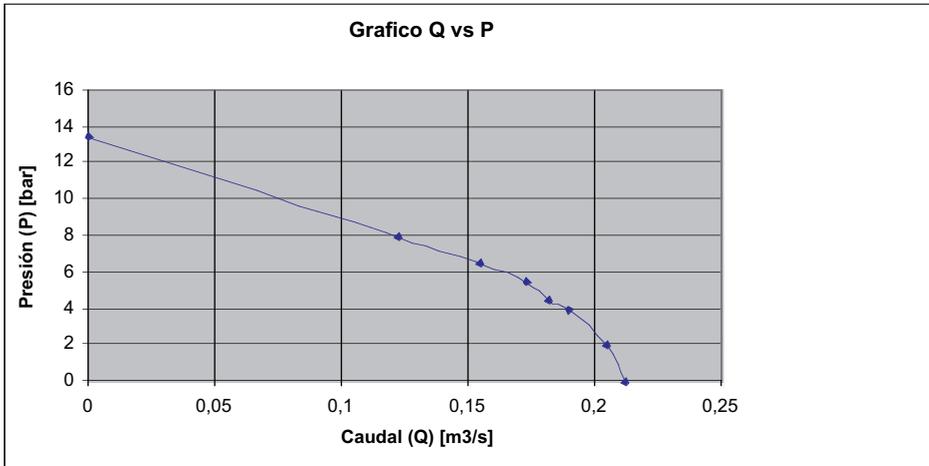


Figura 17. Curva característica motriz H-Q de la bomba de ariete hidráulico, 3 válvulas de impulso

### 3. Resultados

La presión máxima, obtenida con caudal cero, del ariete multi-impulsión en condiciones convencionales, es decir, con sólo una válvula de impulsión, es de 4,2 bar ó 42 m, en relación con la presión obtenida con 2 válvulas que es de 12,3 bar ó 123 m y para 3 válvulas que tenemos una presión máxima de 13,5 bar ó 135 m, lo que indica que existe una clara mejora en la sobrepresión, con la adición de válvulas en serie, es decir con una mejora en el diseño mecánico.

Acerca del punto de trabajo óptimo, se determinó que al tener una válvula y 3 m de altura de entrega ya que se obtienen entre 20 y 27 m de altura para la descarga, acumulando entre 46 y 140 litros por día; para 2 válvulas la altura se encuentra entre 85 y 60 m para la descarga obteniendo un almacenaje entre 60 y 95 litros por día, y para 3 válvulas es entre 100 y 65 m en este rango se puede acumular una cantidad de entre 60 y 117 litros por día.

La válvula check cumple un papel fundamental en el momento de conservar las condiciones de presión máxima entregada por la máquina, por lo que el diseño de la misma deberá registrar una eficiencia muy alta, ya que esta es la encargada de acumular el agua en la cámara de aire, además, se debe conservar siempre el nivel del agua en el tanque de alimentación ya que si no se lo conserva los resultados obtenidos no van a ser los reales, ya que según el teorema de Bernoulli la diferencia de nivel ya no va a ser la misma.

#### 4. Recomendaciones

Es necesario que las investigaciones realizadas en el área de las energías renovables, cuyo alcance fue lograr construir prototipos, se implementen en el sitio seleccionado, donde se generó la información técnica necesaria para los diseños; a fin de presentar a la sociedad un modelo de parque hidráulico, que en la práctica se constituya en alternativas de solución para el riego de cultivos. Caso contrario, el esfuerzo comprometido en las investigaciones desarrolladas, no alcanzará el fin último que es el servicio a la comunidad.

#### Bibliografía

STRETER Victor

1996 *Mecánica de fluidos*. Mc Graw –Hill, Tercera edición, México 1996.

MATAIX, Claudio

*Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Edit. del Castillo, 2da Edición, Madrid.

E RUSSEL, Johnston Jr.

1998 *Mecánica de materiales*, Mc Graw-Hill, Segunda Edición, Santa fe Bogotá.

1961 *Pipe Friction Manual*, Hydraulic Institute, New York.

Plan estratégico del austro, UPS.

III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO-DATOS Azuay-ECUADOR INEC-MAG-SICA.

### Páginas Web

[http://uazuay.edu.ec/promsa/metadatos/c-uso\\_de\\_suelo.doc](http://uazuay.edu.ec/promsa/metadatos/c-uso_de_suelo.doc)

<http://www.sica.gov.ec/agronegocios/Biblioteca/Ing%20Rizzo/agricultura/principal.htm>

<http://uazuay.edu.ec/promsa/metadatos/g-agricultura.doc>

<http://www.bae.ncsu.edu/bae/programs>

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia25/HTML/articulo05.htm>

<http://www.mer.gov.ec/pagina/ministerio.htm>



# 10

## Sistema de riego en campos de cultivos y pastizales mediante aerobomba

John Calle<sup>1</sup>, Juan Guaman<sup>2</sup>, Luis Chunchi<sup>2</sup>

### 1. Introducción

En Ecuador, el desarrollo de la producción agrícola y ganadera se encuentra determinado en gran parte por el riego, tanto en los campos de cultivo como en los pastizales para la cría de ganado (especialmente ganado vacuno destinado a la producción de leche y carne), se necesita irrigación para producir con eficiencia.

En virtud de esto, el Estado ecuatoriano ha emprendiendo proyectos de trasvase de agua para aplicaciones de riego, en la gran mayoría la obra principal ha sido la construcción de canales de riego de uso múltiple. Cuando los terrenos de cultivo o pastos se encuentran por debajo del canal, no existen problemas para el riego, ya que el agua por el efecto de la presión de la fuerza de gravedad fluye libremente hacia éstos; sin embargo cuando dichos terrenos se encuentran por encima del canal, se presentan inconvenientes en el riego, pues en esas circunstancias el agua por si sola no puede llegar a la zonas de irrigación.

---

1 Director del proyecto de investigación, Director de las Carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica Salesiana.

2 Egresados de la Carrera de Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica Salesiana.

Esta es la razón por la cual el agricultor y el ganadero se han visto en la necesidad de llevar el líquido vital desde el canal de distribución hasta sus propiedades mediante la implementación de algún sistema de bombeo de agua que, por lo general, funciona a partir de combustibles fósiles o energía eléctrica; estos sistemas de impulsión representan el 100% de los utilizados hasta hoy en Ecuador y tienen algunos problemas sobre todo de tipo ecológico. Por ejemplo, al almacenar combustible fósil surge un gran inconveniente, porque si no se lo hace de la manera correcta, puede dar lugar a filtraciones hacia el subsuelo con el riesgo de contaminar las aguas subterráneas, además del peligro inminente de incendio. Si la estación de bombeo funciona a base de electricidad y si ésta es generada en plantas térmicas, se ocasionan los mismos problemas mencionados anteriormente; sin señalar que se contribuye a la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera por la quema del combustible.

Ante lo mencionado y en completa identificación con las políticas de la Universidad Politécnica Salesiana, que se fundamentan en el servicio a la sociedad garantizando la sostenibilidad del medio ambiente; se buscará solucionar el problema de bombeo de agua utilizando energías alternativas, específicamente la energía eólica, la misma que deberá garantizar eficiencia, sostenibilidad en el tiempo y costos competitivos en el mercado nacional e internacional; además de fomentar el uso de estas energías limpias, para que en un periodo de tiempo corto se puedan notar sus beneficios.

## **2. Materiales y métodos**

Considerando las características de diferentes zonas del austro del país fue necesario establecer la viabilidad en el uso de la energía eólica, visitando algunos sectores rurales como Paute, Gualaceo, Sigsig y Tarqui se buscó las bondades requeridas para la implementación de una turbina eólica refiriéndose a la escala de Beaufort, propuesta por el almirante inglés Sir Francis Beaufort, en 1805, y aceptada internacionalmente (ver Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Beaufort, consta de 12 grados y es utilizada para tener una idea precisa de la fuerza del viento por observación ocular y aceptada internacionalmente

	Definición	Velocidad			Especificaciones	
		Nudos	m/sg	km/h	En tierra	En mar
0	CALMA	<1	0-0,2	<1	El humo sube verticalmente.	La mar esta como un espejo.
1	VENTOLINA	1-3	0,3-1,5	1-5	La dirección del viento se define por el humo, no por las veletas y banderas.	Rizos sin espuma.
2	FLOJITO (Suave)	4-6	1,6-3,3	6-11	El viento se siente en la cara, se mueven las hojas de los árboles, veletas y banderas.	Olas pequeñas que no llegan a romper.
3	FLOJO (Leve)	7-10	3,4-5,4	12-19	Las hojas de los árboles se agitan constantemente. Se despliega las banderas.	Olas mayores cuyas crestas comienzan aromper. Borreguillos dispersos.
4	BONANCIBLE (Moderado)	11-16	5,5-7,9	20-28	El viento levanta los árboles pequeños. En los estanques se forman olas pequeñas.	Las olas se hacen más largas. Borreguillos numerosos.
5	FRESQUITO (Regular)	17-21	8,0-10,7	29-38	Se mueven los árboles pequeños, en los estanques se forman olas pequeñas.	Olas moderadas alargadas. Gran abundancia de borreguillos eventualmente algunos rociones.
6	FRESCO (Fuerte)	22-27	10,8-13,8	39-49	Se mueven las ramas grandes de los árboles, silban los hilos del telégrafo Se utilizan con dificultad los paraguas.	Comienzan a formarse olas grandes. Las crestas de espuma blanca se extienden por todas partes. Aumentan los rociones.
7	FRESCACHON (Muy fuerte)	28-33	13,9-17,1	50-61	Todos los árboles se mueven. Es difícil andar contra el viento.	La mar engruesa. La espuma de las crestas empieza a ser arrastrada por el viento, formando nubecitas.
8	TEMPORAL	34-40	17,2-20,7	62-74	Se rompen las ramas delgadas de los árboles. Generalmente no se puede andar contra el viento.	Olas de altura mediana y más alargadas. De las crestas se desprenden algunos rociones en forma de torbellinos. La espuma es arrastrada en nubes blancas.
9	TEMPORAL (Fuerte)	41-47	20,8-24,4	75-88	Ocurren desperfectos en las partes salientes de los edificios, cayendo chimeneas y tejados.	Olas gruesas: la espuma es arrastrada en capas espesas. Las crestas de las olas comienzan a romper.
10	TEMPORAL DURO	48-55	24,5-28,4	89-102	Se observa rara vez. Arranca árboles y ocasiona daños de consideración en los edificios.	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. La espuma se aglomera en grandes blancos, siendo arrastrada por el viento en forma de espesas estelas blancas. La superficie del mar parece blanca. La visibilidad se reduce
11	TEMPORAL MUY DURO	56-63	28,5-32,6	103-117	Observada muy rara vez. Ocasiona destrozos en todas partes.	Olas excepcionalmente grandes (los buques de pequeño y mediano tonelaje pueden perderse de vista). La mar está completamente cubierta de bancos de espuma blanca extendida en la dirección del viento. Se reduce aún más la visibilidad.
12	TEMPORAL HURACANADO (huracán)	64-71	32,7-36,9	118-133		El aire esta lleno de espuma y de rociones. La mar está completamente blanca debido a los bancos de espuma. La visibilidad es muy reducida.

Para este efecto, se emplazó en el sector una mini estación anemométrica que mida la velocidad del viento durante al menos 7 meses. Así, se determinó que el sector de Paute se ubica en una escala Beaufort entre 0 y 3; Gualaceo entre 0 y 3; Sigsig entre 1 y 5; y, Tarqui entre 1 y 6, por lo que se decide establecer al molino eólico en este último lugar debido a que presenta las mejores condiciones climáticas y geográficas debido a su accesibilidad.

Además, una región específica de Tarqui cumple con las condiciones necesarias a parte de la velocidad del viento: que no existan obstáculos que varíen la dirección y velocidad del viento y que se encuentre cerca de una fuente de agua.

## 2.1 Datos del lugar escogido

El lugar escogido para el estudio se ubica en la Granja de Irquis de propiedad del CREA (Centro de Reconversión Estatal del Austro) a las orillas del río Irquis, al noreste de la provincia del Azuay, a aproximadamente 18 km al sur de la ciudad de Cuenca, capital de la provincia, en la parroquia Victoria del Portete (ver figura 1).



Figura 1. Fotografía satelital de la parroquia Victoria del Portete

## 2.2 Evaluación del recurso eólico de la zona

El método más acertado para cuantificar correctamente los datos requeridos tanto de dirección como de velocidad del viento es la medición

directa; de acuerdo con este criterio se instaló una estación meteorológica en el lugar del emplazamiento a una altura de 10 m (ver figura 2), y ésta se encargo de recopilar las variaciones de viento durante los siete meses de estudio.

La estación utilizada es una miniestación anemométrica WS 14 marca Weather Port, la misma que está provista de un anemómetro de cazoletas que registra valores de dirección y velocidad del viento. Estos datos se almacenan en un data logger y posteriormente son bajados mediante un programa de computadora y almacenados en formato Excel. (ver figura 3).



Anemómetro de cazoletas

Figura 2. Miniestación anemométrica ubicada a 10 m de altura en la Hacienda Irquis, en la parte superior se ubica el anemómetro de cazoletas



Figura 3. Sistema para registro de datos entregados por el anemómetro de cazoletas

Los datos son tabulados y graficados para identificar los parámetros de viento desde el mes de julio de 2007 hasta enero de 2008, obteniéndose una grafica de cada mes como muestra el ejemplo (ver figura 4):

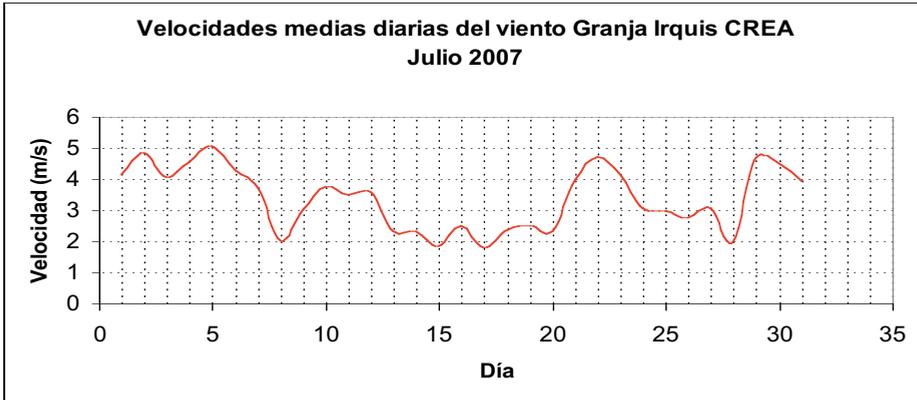


Figura 4. Velocidad del viento en julio 2007

De los datos obtenidos determinamos los siguientes valores que son importantes para el diseño: velocidad máxima 5,04 m/s, velocidad mínima 1,8 m/s, velocidad media 3,5 m/s. Con los datos tomados por la estación anemométrica se realiza el análisis estadístico y la distribución de Weibull para la zona (ver figura 5).

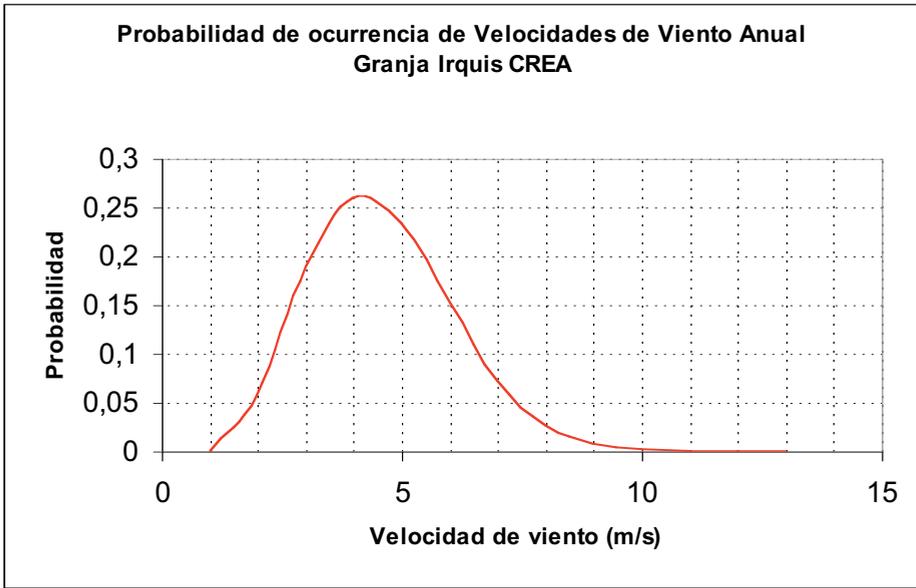


Figura 5. Distribución de Weibull para el análisis estadístico de la velocidad del viento en la Granja Irquis.

El rango de probabilidad más alto está entre las velocidades de 2 m/s y 6 m/s (Manual de Energía Eólica IDAE, 2004). Un molino multiaspas para bombeo de agua puede aprovechar velocidades de viento comprendidas entre los 3 m/s y 7,5 m/s, por lo tanto el estudio realizado garantiza que existe la energía necesaria para la utilización eficiente de la aerobomba en el sistema de riego del sector

### 2.3 Diseño y cálculos de la aerobomba

Para realizar los cálculos y el diseño de la aerobomba fue importante especificar los siguientes datos: una velocidad media del viento de 3,5 m/s, una velocidad máxima del viento de 6 m/s, temperatura ambiente promedio de 10°C y una presión barométrica sobre el nivel del mar de 96,927 kPa. La altura sobre el nivel del mar fue de 2680 m con una superficie de riego o extensión de pastizales de 2 ha.

Se determinó que el caudal de agua necesario para irrigar los pastizales fue de 1,5 l/s con una frecuencia de riego cada ocho días (Estudio de riego para la Granja de Irquis, 2005); el desnivel cuenta con una altura de bombeo de 4 m cuya fuente de agua es el río Irquis, Subcuenca del río Portete de la cuenca del río Paute.

### 2.3.1 Rango de Operación

Debido a que un molino multipalas para bombeo de agua puede aprovechar velocidades de viento comprendidas entre los 3 m/s y 7,5 m/s, éste se diseñó para trabajar en este rango de velocidades. A partir de los 8 [m/s] el molino dejará de operar por seguridad, ya que si funcionara a una velocidad superior a los 8 m/s se correrían riesgos perjudiciales para sus componentes mecánicos.

### 2.3.2 Potencia de bombeo

La potencia necesaria para elevar el agua desde la fuente hasta una altura de 4 metros viene dada por la siguiente fórmula:

$$P_B = \gamma \cdot Q \cdot H$$

Donde:

$\gamma$ =Peso específico del agua = 9806 N/m<sup>3</sup>

$Q$ =Caudal de bombeo = 1,5 l/s

$H$ =Altura de elevación = Altura de desnivel + Pérdidas por fricción  
= 5m

Reemplazando los datos en la fórmula dada anteriormente tenemos que la potencia necesaria para el bombeo es:

$$P_B = \gamma \cdot Q \cdot H = 9810 \frac{N}{m^3} \cdot 1,5 E^{-03} \frac{m^3}{s} \cdot 5m$$

$$P_B = 73,575W$$

### 2.3.3 Diámetro del rotor del molino

Para obtener el diámetro del rotor igualamos la ecuación de la potencia de bombeo con la ecuación de la potencia de un molino multipala, luego despejamos el área del rotor de la ecuación de potencia del molino para encontrar el diámetro del rotor. Este proceso se muestra a continuación:

Potencia del molino multipala esta dada por:

$$P_M = 0,5 \cdot \rho_A \cdot A_R \cdot v_D^3 \cdot C_P$$

Donde:

$\rho_A$ =Densidad del aire en el lugar del emplazamiento

$v_D$ =Velocidad de diseño = 3,5m/s

$C_P$ =Coeficiente de potencia o Rendimiento aerodinámico de molino multipala

$A_R$ =Área del rotor

La densidad del aire viene dada por la ecuación de los gases ideales:

$$\rho_A = \frac{P_B}{R \cdot T}$$

Donde:

$\rho_A$ =Densidad del aire en el lugar del emplazamiento.

$P_B$ =Presión barométrica en el lugar del emplazamiento = 96,927 kPa,

$T$ =Temperatura absoluta en el lugar del emplazamiento = 10+273 = 283K,

Reemplazando los datos en la fórmula tenemos que la densidad del aire es:

$$\rho_A = \frac{P_B}{R \cdot T} = \frac{96,927 \text{ kPa}}{0,2870 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 283 \text{ K}}$$

$$\rho_A = 1,193 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El coeficiente de potencia se relaciona directamente con la velocidad específica del molino multipala; esta velocidad para el bombeo de agua según el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria – España, y según la mayoría de constructores de turbinas eólicas suele ser de 1. Como podemos ver en la figura 6 el rendimiento aerodinámico o coeficiente de potencia correspondería a un valor del 29%.

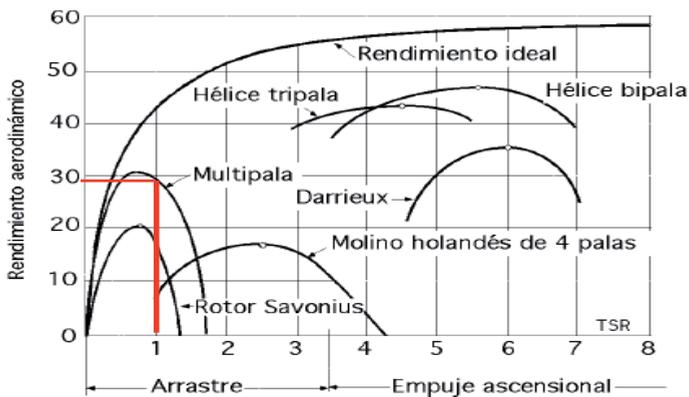


Figura 6. Rendimiento aerodinámico en función de la velocidad específica de un molino multipala para bombeo de agua. (Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética Universidad de Cantabria – España – 2000)

Reemplazando los datos de la densidad del aire así como el coeficiente de potencia del molino multipala se tiene la ecuación (2) en función del área del rotor de la siguiente forma:

$$P_M = 0,5 \cdot \rho_A \cdot A_R \cdot v_D^3 \cdot C_P = 0,5 \cdot 1,193 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot A_R \cdot \left(3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 \cdot 0,29$$

$$P_M = 7,672 \cdot A_R$$

Igualando la ecuación de la potencia del molino con la ecuación de la potencia de bombeo se llega a determinar el área y diámetro del rotor, de la siguiente manera:

$$P_M = 7,672 \cdot A_R$$

$$P_B = 73,575 \text{ W}$$

$$P_M = P_B$$

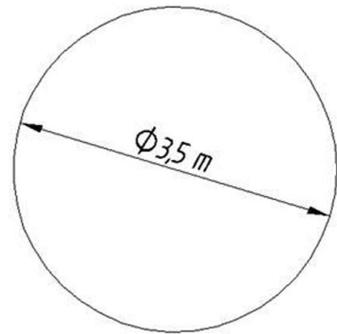
$$7,672 \cdot A_R = 73,575$$

$$A_R = \frac{73,575}{7,672} = 9,589 \text{ m}^2$$

$$r_R = \sqrt{\frac{A_R}{\pi}} = \sqrt{\frac{9,589 \text{ m}^2}{\pi}} = 1,747 \text{ m} \approx 1,75 \text{ m}$$

$$D_R = 3,5 \text{ m}$$

$$A_R = \pi \cdot (1,75 \text{ m})^2 = 9,621 \text{ m}^2$$



Rotor - Molino Multipala

### 2.3.4 Curva de potencia molino multipala

Con el área y el diámetro del rotor calculados se puede graficar la curva de potencia del molino en función de la velocidad del viento para el intervalo de diseño, esto es desde 3m/s a 7,5m/s. Esta curva se puede ver a continuación en la figura 7

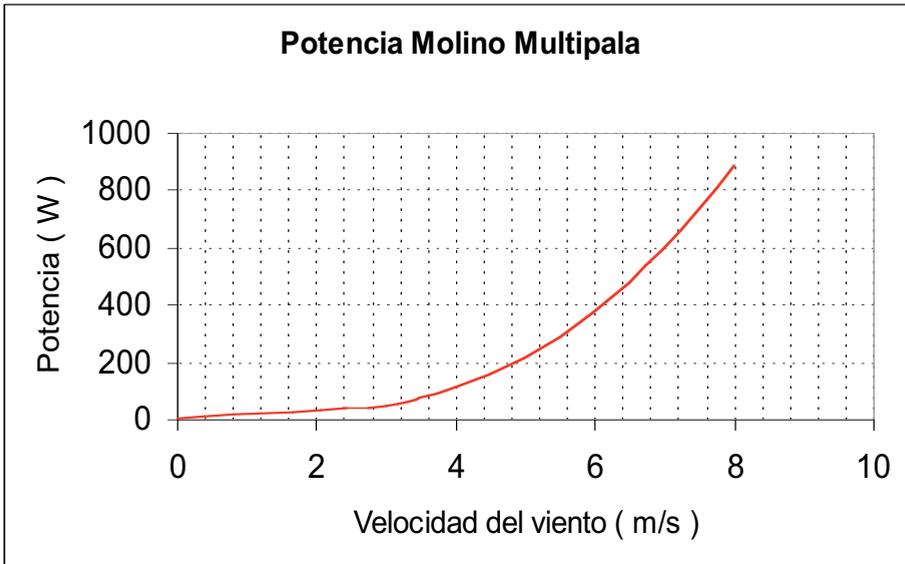


Figura 7. Curva de potencia del molino en función de la velocidad del viento.

### 2.3.5 Revoluciones por minuto del rotor

Para obtener la velocidad de giro del rotor utilizamos la siguiente expresión:

$$N = \frac{60 \cdot TSR \cdot v_D}{\pi \cdot D_R}$$

Donde:

$TSR$ =Velocidad específica del molino = 1.

$v_D$ =Velocidad de diseño = 3,5m/s.

$D_R$ =Diámetro del rotor = 3,5m.

Reemplazando los datos tenemos:

$$N = \frac{60 \cdot TSR \cdot v_D}{\pi \cdot D_R} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 3,5 \frac{m}{s}}{\pi \cdot 3,5m}$$

$$N = 19,098rpm$$

En la siguiente gráfica figura 8 se puede ver como varía las revoluciones por minuto del rotor en función de la velocidad del viento para el intervalo de 3m/s a 7,5m/s.

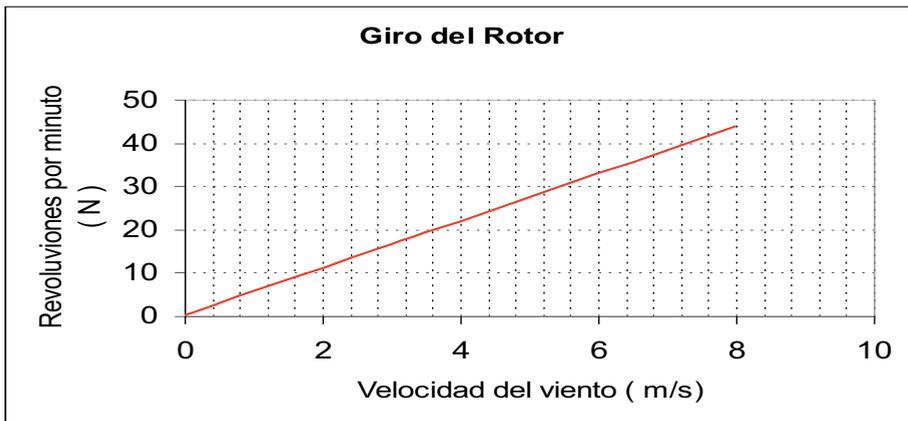


Figura 8. Revoluciones por minuto del rotor en función de la velocidad del viento.

### 2.3.6 Elección del perfil para las palas para el rotor

Para la elección del tipo de perfil para las palas del rotor utilizamos la siguiente tabla:

Tabla 2. Perfil de las palas de un rotor en función del ángulo de ataque, el Coeficiente de sustentación y el Coeficiente de arrastre. (Lauven, 1980).

	Forma Perfil	Arrastre/ Sustentación	Angulo ataque	Coef. Sustentación
Lámina Plana		0,1	5	0,8
Lámina curvada 10% de curvatura		0,02	3	1,25
Lámina curvada con un tubo en el lado cóncavo		0,03	4	1,1
Lámina curvada con un tubo en el lado convexo		0,2	14	1,25
Perfil NACA 4412		0,01	4	0,8

Debido a que se diseña un molino para bombeo de agua se elige el perfil de la segunda fila de la tabla, este perfil es una lámina curvada con un 10% de curvatura.

Las características del perfil seleccionado de acuerdo a la tabla son las siguientes:

$$\alpha = \text{Ángulo de ataque} = 3^\circ$$

$$C_L = \text{Coeficiente de sustentación} = 1,25$$

$$C_D = \text{Coeficiente de arrastre} = 0,025$$

### 2.3.7 Número de palas o álabes del rotor:

El número de palas del rotor está en función de la velocidad específica de diseño que en este caso es de uno ( $TSR = 1 = \lambda$ ). En la tabla se puede ver como se relaciona el número de palas del rotor con la velocidad específica de diseño también llamada celeridad.

Tabla 3. Número de palas del rotor recomendadas en función de la celeridad del rotor. (T. Sánchez, 2007)

Celeridad ( $\lambda$ )	Número de álabes Recomendado (Z)
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 8	2 - 3
8 - 15	4 - 2

De acuerdo a la tabla para una celeridad de 1, podemos elegir entre 6 y 20 álabes para el rotor, pero como nuestro molino multipala no se caracteriza por ser una maquina rápida no elegiremos 6 álabes para el rotor, y mas bien se optará por 16 álabes para lograr que el rotor alcance una solidez de un 75%; por lo tanto,  $Z = 16$  álabes. En el gráfico (ver figura 9) se puede ver como varía la solidez de una máquina eólica en función de la velocidad específica:

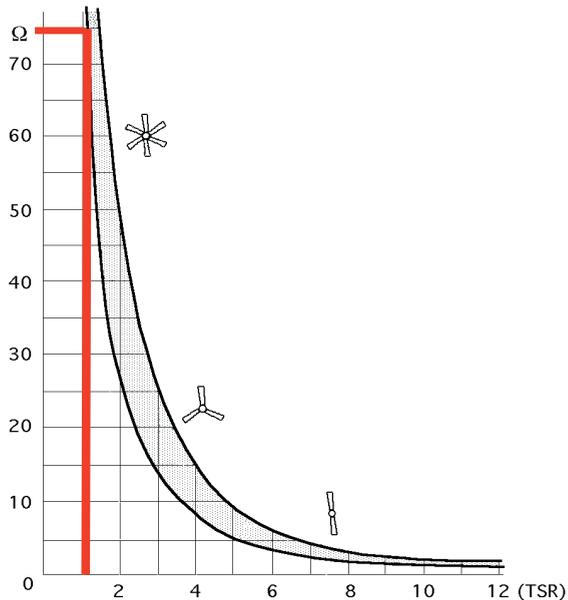
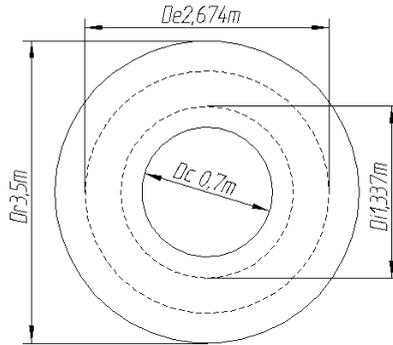


Figura 9. Curva que indica la solidez de una máquina eólica en función de la velocidad específica. (Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria, España)

El radio del cubo del rotor, el radio de los anillos de sujeción de los álabes luego del cálculo correspondiente presentan las siguientes dimensiones:



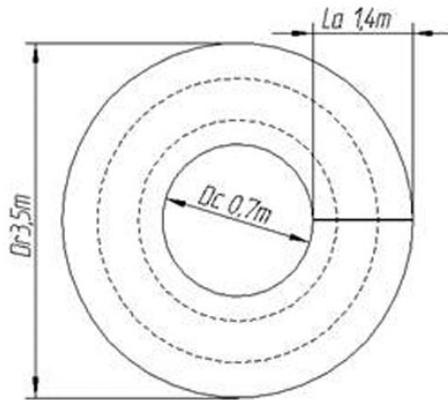
### 2.3.8 Longitud del ábabe:

La longitud del ábabe es la diferencia entre el radio del rotor y el radio del cubo, esto se expresa de la siguiente manera:

$$L_A = r_R - r_C$$

$$L_A = 1,75m - 0,35m$$

$$L_A = 1,4m$$



### 2.3.9 Forma del álabe

La forma del álabe se rige por medio de las siguientes fórmulas (5). Y se muestra en la figura 10. (Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza, España)

$$\lambda_R = \frac{\lambda \cdot r}{r_R}$$

$$\phi = \frac{2}{3} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\lambda_R}\right)$$

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot (1 - \cos \phi)}{Z \cdot C_L}$$

$$\beta = \phi - \alpha$$

Donde:

$\lambda_R$  = Celeridad local a la distancia r del rotor

$\lambda$  = Celeridad de diseño = 1

r = Distancia desde el centro del rotor a la distancia evaluada

$\phi$  = Ángulo formado por la velocidad relativa con el plano de giro del rotor

C = Longitud de la cuerda de la sección del álabe

$\beta$  = Ángulo formado por el álabe con el plano de giro

$\alpha$  = Ángulo de ataque = 3°

$C_L$  = Coeficiente de sustentación del álabe

Z = Número de álabes = 16

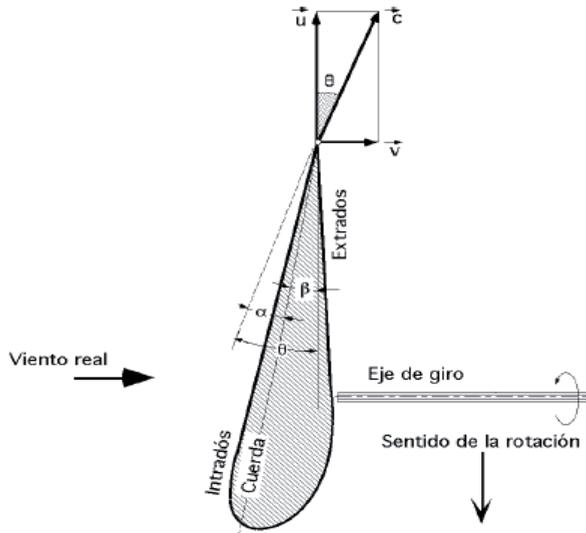


Figura 10. Gráfica del álabes con las condiciones calculadas.

Haciendo uso de las ecuaciones anteriores, realizando la linealización del perfil del álabes y linealizando el ángulo, se logra obtener los que determinaran las dimensiones para la construcción de la pala (figuras 11.a y 11.b)

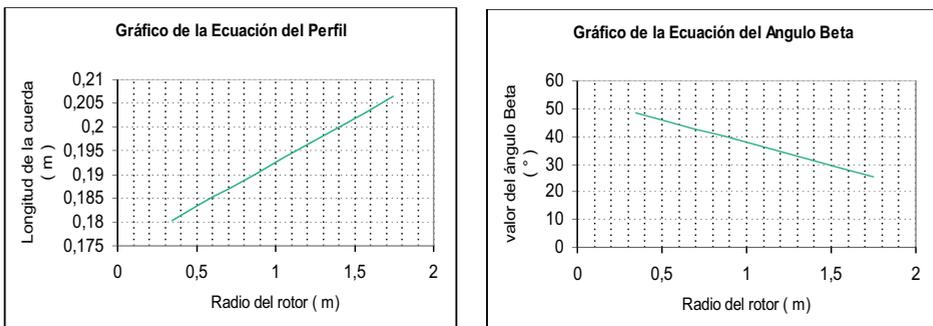


Fig. 11 a) Gráfico de la Ecuación del Perfil del álabes, mostrando la longitud de la cuerda en función del radio del rotor, b) Se muestra la variación del ángulo beta en función del radio del rotor.

### 2.3.10 Fuerza centrífuga en el álabe

Con todas las variables calculadas la fuerza centrífuga en el álabe sería:

$$F_C = \frac{m \cdot v_P^2}{r_G}$$

$$F_C = \frac{3,181 \text{ kg} \cdot \left(7,513 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{1,0657 \text{ m}}$$

$$F_C = 168,514 \text{ N}$$

Donde:

$m$  =Masa del álabe

$v_P$ =Velocidad periférica del rotor

$r_G$ =Distancia desde el dentro del rotor al centro de gravedad del álabe

### 2.3.11 Cálculos de la Tornamesa

El centro de gravedad de la tornamesa figura 12 está dado por las siguientes relaciones (Small Aerogenerators for the rural areas of Perú, 2002)

$$L_1 = \frac{1}{14} \cdot D_R$$

$$L_2 = \frac{2}{3} \cdot D_R$$

$$L_1 = \frac{1}{14} \cdot D_R$$

$$L_1 = \frac{1}{14} \cdot 3,5 m$$

$$L_1 = 0,25 m$$

$$L_2 = \frac{2}{3} \cdot D_R$$

$$L_2 = \frac{2}{3} \cdot 3,5 m$$

$$L_2 = 2,33 m$$

Donde:

$L_1$ =Distancia desde el rotor hasta el centro de gravedad de la tornamesa

$L_2$ =Distancia desde la veleta hasta el centro de gravedad de la tornamesa

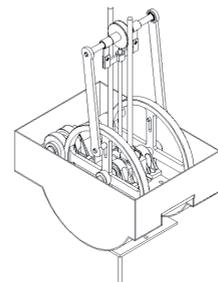
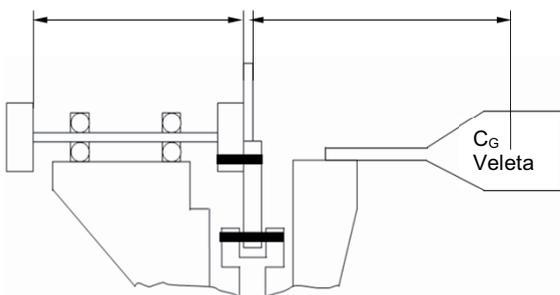


Figura 12. Diseño y distancias de la tornamesa

### 2.3.12 Peso del rotor:

El peso del rotor está dado por:

$$\begin{aligned}
 W_R &= m_{Total} \cdot g + 0,10 \cdot (m_{Rotor} \cdot g) \\
 W_R &= 76,344kg \cdot 9,806 \frac{m}{s^2} + 0,10 \cdot \left( 76,344kg \cdot 9,806 \frac{m}{s^2} \right) \\
 W_R &= 823,492N
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 W_R &= \text{Peso del rotor} \\
 g &= \text{Gravedad} \\
 m_{Total} &= \text{Masa total de las palas del rotor}
 \end{aligned}$$

### 2.3.13 Fuerza de la veleta:

Como ya se tiene la ubicación del centro de gravedad de la torname-sa se procede a calcular la fuerza vertical que ejerce la veleta, para esto se realiza una sumatoria de momentos con respecto al centro de gravedad de la torname-sa de la siguiente forma.

$$\sum M_0 = W_R \cdot L_1 - F_V \cdot L_2 = 0$$

Donde:

$F_V$ =Fuerza vertical ejercida por la veleta, dada por (9)

$$F_V = \frac{W_R \cdot L_1}{L_2}$$

$$F_V = \frac{823,492N \cdot 0,25}{2,33m}$$

$$F_V = 88,3575N$$

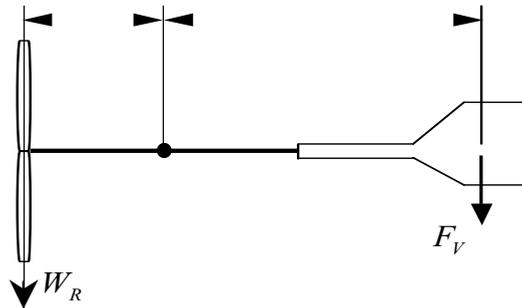


Figura 13. Diseño y dimensiones de la veleta

### 2.3.14 Área de la veleta

El área de la veleta está en función del área del rotor de la siguiente forma:

$$A_V = \frac{1}{8} \cdot A_R$$

Donde:  $A_R$  = Área del rotor =

$$A_V = \frac{1}{8} \cdot 9,589m^2 = 1,198m^2$$

Al conocer el área de la veleta podemos determinar sus dimensiones, de la siguiente manera.

$$A_v = 0,437 \cdot x^2$$

$$x = \sqrt{\frac{A_v}{0,437}} = \sqrt{\frac{1,198m^2}{0,437}} = 1,656m$$

Conociendo la longitud de la veleta podemos determinar las dimensiones restantes, que se muestran en la figura 10.

$$y = \frac{x}{2} = \frac{1,656m}{2} = 0,828m$$

$$a = \frac{x}{4} = \frac{1,656m}{4} = 0,414m$$

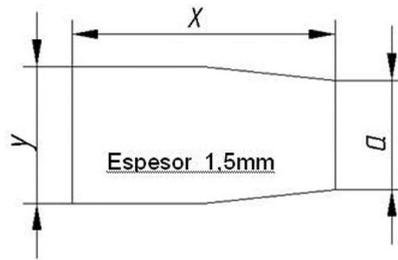


Figura 14. Diseño con las dimensiones  $x$ ,  $y$  e  $a$  de la veleta.

### 2.3.15 Diámetro del Pistón de la Bomba

El área del pistón de la bomba viene expresado con la siguiente fórmula matemática (Torquati, 2001):

$$A_p = \frac{Q}{S \cdot N \cdot \eta_v \cdot i}$$

Donde.

$A_p$ =Área del pistón

$Q$ =Caudal de bombeo =  $1,5E^{-3}m^3/s$

$S$  =Recorrido del pistón, entre 70 y 100mm

$N$  =Golpes por minuto = Revoluciones por minuto del rotor = 19rpm

$\eta_V$  =Rendimiento volumétrico = 0,9

$i$  =Constante = 1

Para el cálculo del diámetro se tiene:

$$A_p = \frac{Q}{S \cdot N \cdot \eta_V \cdot i}$$

$$A_p = \frac{1,5E^{-3} \frac{m^3}{s}}{90E^{-3} m \cdot 19 \cdot 0,9 \cdot 1} = 9,746E^{-04} m^2$$

$$D_p = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} = 0,03522m = 3,522cm = 35mm$$

De acuerdo al cálculo se puede ver que el diámetro del pistón es de 35mm, pero es necesario determinar con pruebas de campo la eficiencia de la bomba.

### 2.3.16 Diseño del eje principal

Seleccionamos en primer lugar los diámetros de 50 y 60 mm para el eje principal, considerando carga y factor de escala.

Para la determinación de la resistencia del eje, se realizan los cálculos necesarios: en primer lugar:  $F_a$ , que es la fuerza ejercida en la columna de agua por la bomba hasta la altura establecida, y con este dato calculamos el eje a fatiga, como indica la figura 11.

Datos:

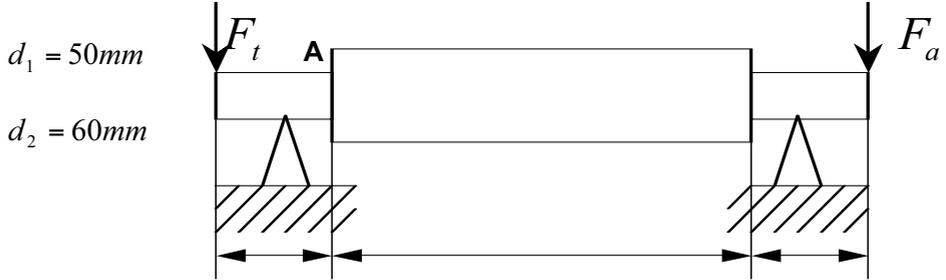


Figura 15. Diseño del eje principal y sus dimensiones

Posteriormente escogemos el material. Para nuestro caso elegimos un acero AISI 1045, el mismo que presenta las siguientes características:

Resistencia última a la tensión =  $S_{ut} = 630\text{MPa}(91\text{kPsi})$

Resistencia de fluencia =  $S_y = 530\text{MPa}$

Para garantizar la resistencia tenemos la siguiente condición:

$$S'_e = 0,504 * S_{ut} \quad \text{cuando} \quad S_{ut} \leq 200\text{kPsi}(1400\text{MPa})$$

Se tiene que la resistencia a la fatiga es:

$$S'_e = 0,504 * S_{ut}$$

$$S'_e = 0,504 * 630\text{MPa}$$

$$S'_e = 317,52\text{MPa}$$

Finalmente se tiene que el esfuerzo es:

$$\sigma = 1480353177 Pa = 17,45 MPa$$

Por lo tanto, el esfuerzo es menor que el límite a la fatiga lo que quiere decir que el eje construido en el material escogido y las dimensiones correspondientes resistirá con toda seguridad.

### 2.3.17 Diseño de la torre

Para el diseño de la torre se utilizó el software de Multiframe con el que se desarrolló un análisis estructural adecuado tanto en forma como en dimensiones y se definió como material ángulo estructural de 2 x 2 x 3/16 que es un material que fácilmente se puede encontrar en el mercado local, y que soporta el peso y las solicitaciones mecánicas a las que va a estar expuesto. Tal como se muestra en la figura 12.

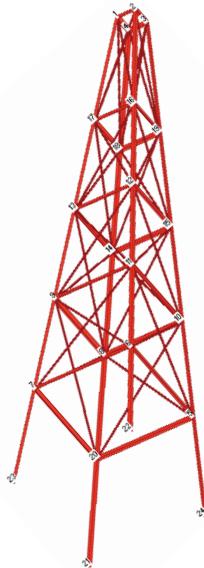


Figura 16. Diseño escogido para la torre

### 2.3.18 Construcción de la aerobomba.

Con los planos de todos los elementos realizados se procedió a la construcción de todas las partes de la aerobomba en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Cuenca, tal como se muestra en la secuencia de la figura 13.

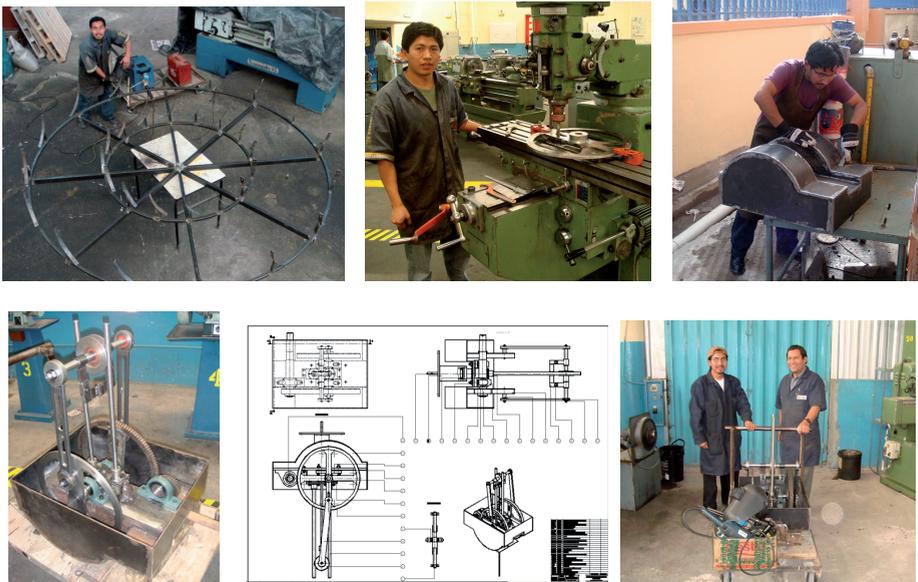


Figura 17. Construcción de las partes de la aerobomba en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana. Sede Cuenca

### 2.3.19 Emplazamiento de la aerobomba

Para realizar el emplazamiento de la aerobomba se requirió en primer lugar realizar una derivación del río Iruquis con maquinaria pesada, luego construir un tanque y las zapatas correspondientes para la sujeción de la torre, las mismas que debían garantizar que no se produzca el vuelco de la misma, y posteriormente se realizó el montaje que por las condiciones del sector se tornó dificultoso, como se indica en la secuencia de la figura 14.



Figura 18. Pasos para la construcción y emplazamiento de la aerobomba en la derivación del Río Irquis

## 2.4 Costo de construcción y emplazamiento de la aerobomba

	<i>Costo</i>
Aerobomba	\$4.000,00
Emplazamiento	\$1.500,00
<b>Total</b>	<b>\$5.500,00</b>

## 3. Resultados

El análisis preliminar del sitio de estudio se realizó con la Escala de Beaufort determinándose dos posibles lugares, de los cuales se escogió el que se encuentra en la parroquia Victoria del Portete, en la granja de Irquis de propiedad del CREA, el mismo que presenta las bondades requeridas

para el desarrollo del proyecto. Al realizar la toma de datos en el sitio escogido mediante la estación anemométrica WS 14, para su posterior tabulación estos datos y análisis estadístico con la distribución de Weibull, se determinó una velocidad media de 3,5 m/s y una alta probabilidad de ocurrencia de vientos entre 3 m/s y 5 m/s

Se realizó el cálculo y diseño de todos los componentes de la aerobomba tomando como punto de partida los datos de viento y las características necesarias para realizar el riego en el sector. Asimismo, se construyeron todos los elementos con materiales que se pueden conseguir en la localidad, con maquinaria y tecnología convencional. Además se realizó el emplazamiento de la aerobomba, obteniéndose como resultado un adecuado funcionamiento de la máquina eólica. Finalmente, se acopló la bomba al molino multiaspas para producir el bombeo del agua satisfactoriamente.

El arranque de la Aerobomba se dió con una velocidad de viento de 2 m/s y el sistema mecánico de la Aerobomba funciona con una eficiencia de un 95%. Además el sistema de orientación es óptimo, ya que se adapta rápidamente a las variaciones de la dirección del viento con facilidad.

Finalmente, con una velocidad de viento de 3 m/s se logra bombear un caudal de de 12 gal/min, a una altura de 15 m con un costo de construcción y emplazamiento de aproximadamente \$5.500,00

#### **4. Discusión**

La escala de Beaufort es una herramienta simple pero valiosa y nos permite cuantificar de forma general la energía del viento en zonas determinadas por lo que se recomienda su utilización.

La aerobomba diseñada se puede construir en su totalidad con materiales que se pueden conseguir con facilidad en el Ecuador con un costo de construcción y emplazamiento de la aerobomba es competitivo con sistemas que se pueden conseguir fuera del país, y al utilizar energía renovable

es un sistema limpio que aporta al cuidado del medio ambiente, además el impacto ambiental generado por la implementación del sistema es mínimo comparado con las ventajas que presenta, se convierte en una alternativa viable para el riego en campos de cultivos y pastizales, por esto se recomienda ampliamente el uso de este tipo de energías limpias cuyo uso ha sido discriminado únicamente por falta de conocimiento.

La eficiencia de la bomba debe ser monitoreada con las diferentes velocidades de viento y se podría trabajar para mejorar su diseño.

## Bibliografía

BUSTOS, Fernando

2007 *Manual de gestión y control ambiental*, R.N. Industria Gráfica. Ecuador, 2007.

CIEMAT

1997 *Principios de conversión de la energía eólica*. Edit, CIEMAT. Madrid, España.

FERNANDEZ, Diez Pedro

2000 *Antecedentes Históricos y fuentes eólicas*, Universidad de Cantabria, España.

FOLLETO

1998 *Energía Eólica* Ministerio de Energía y Minas Dirección de Energías Alternativas. Quito, Ecuador.

FUNIBER

2004 *Módulos para Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales*.

GREENE, Richard W.

1988 *Válvulas selección, uso y mantenimiento*. McGraw Hill. México D. F.

MORA HIDROVO, Eduardo W.

1983 *Utilización de energía eólica para extracción de agua*, ESPOL. Dpto. de Ingeniería Mecánica, Guayaquil, Ecuador.

McNAUGHTON, Kenneth

1988 *Bombas selección, uso y mantenimiento*, McGraw Hill. México D. F.

OLADE. 1983. *Atlas Eólico preliminar de América Latina y el Caribe*. Volumen III OLADE. Quito Ecuador

ROBERT L. MOTT. *Diseño de Elementos de Máquinas*, Prentice Hall. México, 1992.

REGISTRO Histórico de la dirección predominante del viento en rumbos

2001 Aeropuerto Mariscal Lamar. Cuenca.

REGISTRO de Frecuencias de la distribución del viento en rumbos

1996 Aeropuerto Mariscal Lamar. Cuenca.

RODRIGUEZ, Florencio

1992 *Riego por goteo*, Edit. A.G.T. México D.F. 158, 1992.

SHIGLEY, Joseph Edward/MISCHKE Charles

1997 *Diseño de Energía Mecánica*, McGraw Hill. México D.F., Madrid. 883 p.

SANCHEZ, Teodoro

2007 Informe del II Seminario Internacional sobre energías renovables, ITDG. Santa Cruz, Bolivia.

Manual de energía eólica IDAE (*Instituto para la Diversificación del Ahorro de Energía*)

2004 Madrid, España.

Estudio de riego para la Granja de Irquis, CREA, 2005.

LAUVEN J. Van

1980 *Introduction to Wind Energy Conversion*, Holanda.

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, España.

*Departamento de Ingeniería Eléctrica*, Universidad de Zaragoza, España.

Small Aerogenerators for the rural areas of Perú, 2002.

TORQUATI, Ing. Carlo Enzo, Industrias Jobber, Colombia.

### Páginas electrónicas

<http://www.energias-renovables.com/paginas/index.asp>.

<http://www.windpower.dk.org>. Asociación danesa de la industria eólica.

<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/revistas/agua5/agua5.html>

<http://www.unb.br/fav/renova/reno/enerpmya.pdf> Sitio Web sobre energías renovables.

[http://www.iter.es/pre\\_metereo.htm](http://www.iter.es/pre_metereo.htm). Sitio Web sobre meteorología.

<http://www.jbornay.com> Sitio Web sobre características y selección de molinos de viento.

<http://www.geociites.com/jandradem2001/Infogen.htm> Sitio Web sobre diseño de molinos de viento.

[http://www.hispagua.cedex.es/GRUPO1/Tes\\_hidro/HTML/HID\\_C2.HTM](http://www.hispagua.cedex.es/GRUPO1/Tes_hidro/HTML/HID_C2.HTM)

<http://www.solarweb.net>

<http://www.eostechnic.com>

[http://www.fiasa.com.ar/molinos\\_fiasa\\_sapnish.htm](http://www.fiasa.com.ar/molinos_fiasa_sapnish.htm)

<http://www.chileriego.cl/revista/diario3.htm> Sitio Web sobre riego

<http://www.eead.csic/riego/a1/riego1.htm> Sitio Web sobre riego por aspersores



Nelson Jara<sup>1</sup>, Felipe Saquicela<sup>2</sup>, Iván Velepucha<sup>2</sup>

## 1. Introducción

De acuerdo a los resultados obtenidos en el Plan de Desarrollo Provincial, en coordinación del Consejo Provincial del Azuay se manejan estadísticas en cuanto a la calidad de terrenos cultivables que se poseen en la provincia del Azuay, de esto se puede indicar que el 60% de terrenos cultivables tienen una pendiente no menor al 40 %, haciendo que las actividades productivas sean cada vez más difíciles y costosas, ya que los sistemas de bombeo de agua convencionales (moto-bomba eléctrica o MCI-bomba) poseen un alto costo de funcionamiento (costo de combustibles o electricidad), llegando a encarecer el producto y elevando los costos de producción; todo esto lleva a los campesinos a desistir el hacer producir sus tierras y los empuja a tomar decisiones como la migración.

El presente trabajo muestra una alternativa para el bombeo mediante energías renovables; es menester que en el sitio a emplazar se cuente con una vertiente o riachuelo del que se pueda obtener la energía suficiente para hacer girar una rueda hidráulica, el reto que se plantea en este proyec-

---

1 Director del proyecto de investigación, Coordinador de extensión universitaria y pasantías, Facultad de Ingenierías, Univesidad Politécnica Salesiana.

2 Egresados de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Univesidad Politécnica Salesiana.

to es llevar agua a un desnivel total de 120 metros en una distancia lineal de pendiente de 740 metros.

Las Sistemas de Bombeo propuestos trabajarán mediante la energía (Torque, Potencia) que entregue una rueda hidráulica movida por la fuerza del desplazamiento de agua, logrando así un funcionamiento de manera automática y constante sin consumir combustibles o electricidad; estos sistemas son de bajo costo en comparación con moto-bombas a diesel o eléctricas, de fácil instalación (puede ser instalada por su propio dueño) y de mínima manutención (con un costo anual menor al 5% del costo del equipo).

Sin embargo, es importante mencionar que para lograr que los sistemas de bombeo de agua con energía renovable sean una solución viable y sustentable en aplicaciones de poblaciones remotas, la intervención de la tecnología debe estar acompañada de una estructura institucional adecuada y manejable. Entre los cuales cabe destacar algunos puntos como: el apoyo local de la comunidad y su capacitación es crucial y las responsabilidades y propiedad de los sistemas deben establecerse tempranamente ya que la supervivencia a largo plazo del sistema se basa en su mantenimiento.

Además, es importante indicar que para todos los proyectos con energía renovable es necesaria una planeación a largo plazo, y las organizaciones ejecutoras de proyectos deben luchar para trabajar con la industria para realizar instalaciones, fortaleciendo así a la industria local, a la vez, que se desarrolla una infraestructura para el mantenimiento de los sistemas.

Para evitar abandonos, los sistemas de bombeo de agua con energía renovable deben ser de un tamaño realista y deben contar con controles institucionales adecuados desde su concepción. Sólo así los sistemas de bombeo de agua con energía renovable podrán dar un servicio confiable y duradero.

Se considera que al tener el respaldo de la Universidad Politécnica Salesiana este proyecto tendrá su incidencia directa en los usuarios; al momento se tiene planificado el emplazamiento en Yumacay–Paute, Campus Juan Lunardi; la intención será en primera instancia probar los equipos para riego, verificar su eficiencia y luego presentar a las comunidades de la cuenca del río Paute como una alternativa de riego fiable y económica.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Análisis del sitio Yumacay, Paute

Al realizar los análisis *in situ* se determinó que el sitio idóneo para la implementación de un sistema de bombeo mediante rueda hidráulica fue Yumacay, en los predios de la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Juan Lunardi de Paute, debido a que cumple los requisitos fundamentales como poseer un río o vertiente en donde se pueda contar con un caudal de agua constante durante todo el año, tanto para mover la turbina como para el riego de la región, además la zona debe presentar desniveles de hasta 10 m para ser aprovechados como salto hidráulico (distancia desde donde se captará el agua hasta donde se ubicará el equipo de bombeo) y los terrenos para el cultivo deben tener una pendiente no menor a 40° y estar ubicados en sitios con desniveles de hasta 120 m desde la captación del agua.

Específicamente, Yumacay dispone de terrenos para ser cultivados con desniveles de entre 50 y 150 m sobre el nivel del depósito de captación de agua de aproximadamente 40.000 m<sup>3</sup> que ya está implementado en dicha zona, este depósito está alimentado por una vertiente de agua; sumado a esto y por la orografía del sitio, se cuenta con el suficiente salto hidráulico para hacer funcionar la rueda, tal como muestran las Figuras 1a y 1b.



Figura 1. a) (izq.) Reservorio de agua en la zona baja de Yumacay  
b) (der.) Área de cultivo con pendiente de 40°.

Es importante indicar que en Yumacay, no se tiene establecido el tipo y área exacto de cultivo, por lo que se ha señalado únicamente la hipótesis de llegar con el fluido hasta el estanque de acumulación, de esta forma se pueden validar caudales entregados por la bomba de un rango entre 0,1 l/s a 0,35 l/s.

## 2.2 Medición de alturas y longitudes para el emplazamiento

Para la medición de alturas del salto hidráulico y desnivel total con respecto a la posible ubicación de la turbobomba se utilizaron dos métodos, el primero es el de manguera de nivelación, que consiste en llenar de agua una manguera transparente de aproximadamente 10 m de longitud e ir controlando en el sitio el desnivel en función de medir la altura de la columna de agua con respecto al desnivel del piso, basado en el principio que “los vasos comunicantes”. El segundo método utilizado fue el de realizar mediciones con equipo GPS (*Global Position System*), mismo que recomienda se determine posiciones (hitos) que pasan a ser puntos referenciales de medición tanto de desnivel como de longitud de pendiente, en cuanto a las longitudes se realizó la medición directamente en el sitio, utilizando una cinta métrica.

Así, se logró determinar que en el sitio a emplazar hay 30,5 m de longitud en la pendiente y desde el reservorio se tiene 10 m de desnivel,

logrando de esta forma un salto hidráulico adecuado. En cuanto a la altura de bombeo existen 120 m de desnivel desde el sitio de ubicación del estanque de acumulación de agua para riego hasta el sitio de ubicación del sistema de bombeo mediante rueda hidráulica, además una vez determinando el camino a seguir de la tubería que comunica la bomba hasta el estanque de acumulación, se estableció que existen 766 m de longitud de pendiente o distancia de bombeo.

### 2.3 Medición de caudal en la vertiente

El valor de caudal exacto de la vertiente, y el aseguramiento de su presencia durante todo el año son los factores preponderantes en la implementación de un sistema de esta naturaleza. Es así que para la medición del caudal se procedió a instalar en la vertiente (aguas arriba del sitio seleccionado a ubicar la rueda) un vertedero triangular a  $90^\circ$  (recomendado por su gran precisión en caudales menores a 110 l/s) ver las Figuras 2a, y 2b.



Figura 2. a) (izq.) Vertiente (Yumacay) b) (der.) Vertedero metálico colocado en la vertiente

Una vez colocado el vertedero con escotadura triangular a  $90^\circ$ , se ha procedido a tomar mediciones de la altura desde el vértice hasta el nivel que presente el agua, valor que luego de aplicar una ecuación, determina la cantidad de litros por segundo que esta desplazándose por esa vertiente, ver figuras. 3a y 3b.

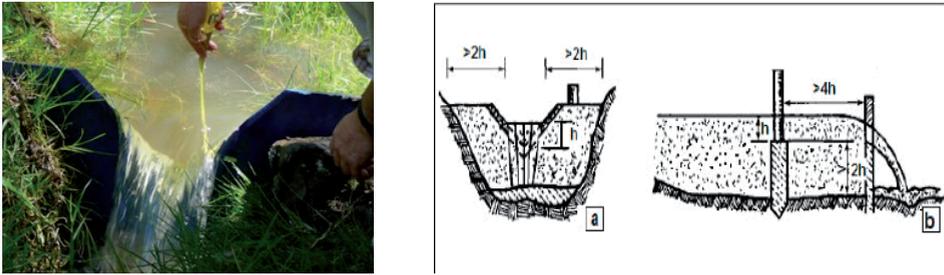


Figura 3. a) (izq.) Medición de la altura en el vertedero  
b) (der.) Sitio de ubicación de la estaca para medición

Así, se han obtenido diversos valores de caudal en las mediciones realizadas durante cada semana y mes del período mayo de 2007 hasta abril de 2008. Se puede notar en la información presentada en la figura 3, que el valor promedio de caudal presentado en el riachuelo en los distintos meses del periodo de medición cambia trascendentalmente en los meses de julio de 2007 y de febrero hasta abril de 2008, dándonos un valor promedio de 42,95 l/s siendo este valor el que se hubiese tomado para el diseño hidráulico de la rueda; sin embargo, con la intención de asegurar el caudal de alimentación para este proyecto de bombeo se obviaron los meses antes citados ya que los valores altos de caudal se debieron al temporal presentado en aquellas fechas y por lo tanto se convertían en datos atípicos; así el valor que se tomó como parámetro de diseño fue un caudal promedio de 26,4 l/s, que al redondearlo queda en 25 l/s.

## 2.4 Planificación del sistema de bombeo hidráulico

Se establecen los componentes que forman parte del sistema de bombeo por rueda hidráulica: Depósito (Embalse que se cuenta en la zona de Yumacay), Tubería de carga, Rueda hidráulica, Bomba de pistón de doble efecto, salida al canal (retorno del agua a la vertiente), Tubería de alimentación de agua, Estanque (depósito en la parte alta para almacenar el agua para riego), ver figura 4.

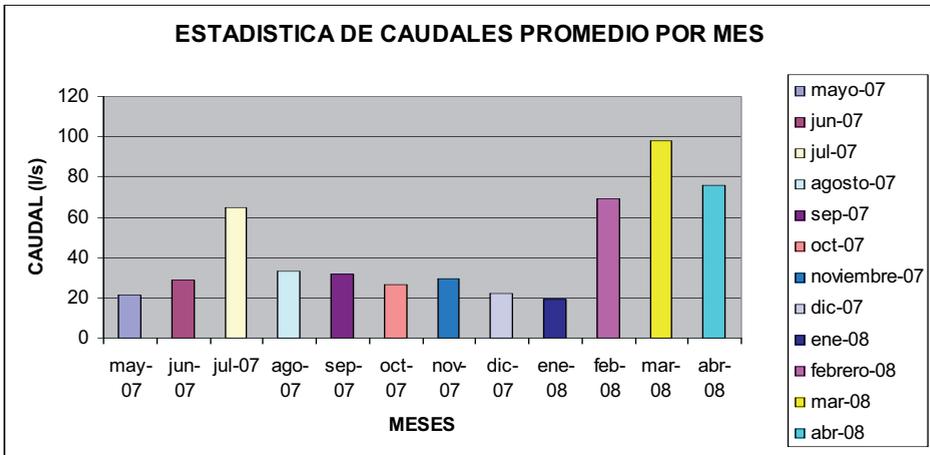


Figura 4. Estadísticas de caudal obtenidas en base a las mediciones semanales, se eliminaron los datos de los meses de julio 2007 y de febrero hasta abril 2008 por deberse a condiciones atípicas.

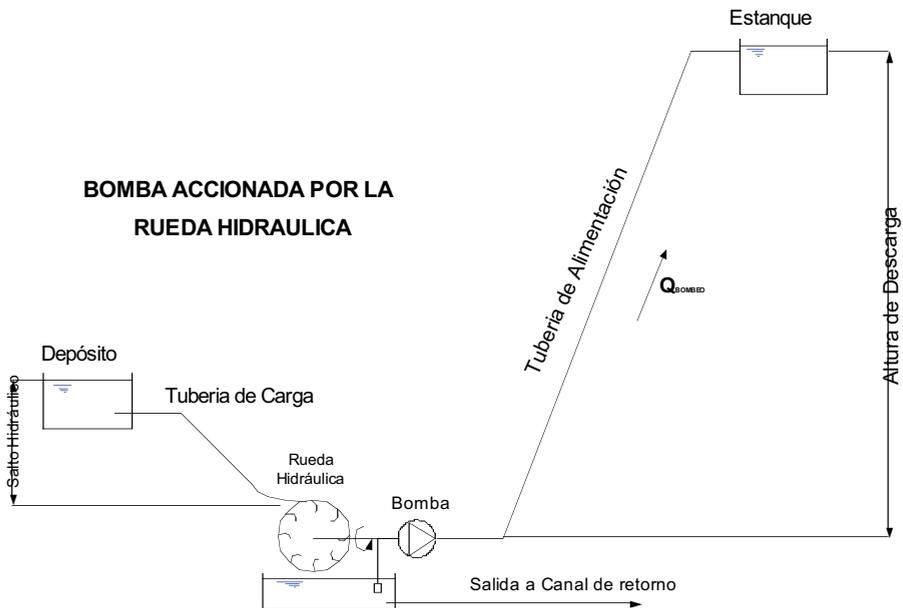


Figura 4. Esquema de sistema de bombeo por rueda hidráulica

El tipo de tubería a utilizar para la carga y elevación del agua, será de cloruro de polivinilo (PVC) enterrado a una profundidad mínima de 5 cm o protegido con algún recubrimiento, ya que no lleva ninguna barrera frente a la radiación solar.

## 2.5 Diseños hidráulicos y mecánicos de la rueda hidráulica

A partir de los valores obtenidos de caudal, salto hidráulico, desnivel total al elevar el agua, longitudes, tipos de tubería, materiales, etc., se procede a diseñar la rueda hidráulica, el pistón y el cálculo de diámetros de tuberías más accesorios. Los análisis realizados han tomado en cuenta teorías y conceptos hidráulicos y mecánicos, de esta manera se obtiene valores fundamentales como el diámetro exterior de la rueda, ancho, número de álabes, perfiles y curvaturas de álabes, sistemas de sujeción, ejes soporte, ubicación del chorro, dimensiones del pistón de doble efecto, sistema de accionamiento del pistón, etc.

### 2.5.1 *Diseño y construcción de 6 ruedas hidráulicas modelo calculadas basados en la teoría de la semejanza*

Una vez obtenida la información correspondiente del sistema, era menester probarlo antes de construir, por lo que se diseñaron seis ruedas a escala (aplicando la teoría de la semejanza), ver figura 5, en dos juegos de tres, cada juego presenta una variante de la curvatura y ángulos del perfil de álabes y el número de álabes, la intención es probar la teoría haciendo funcionar estas ruedas en un banco de pruebas, los parámetros que se requieren medir son el torque que genera la rueda y las revoluciones que alcanza con la acción de un chorro de agua.

La teoría de las turbomáquinas se basa en las relaciones entre chorros y álabes. La mecánica de transferencia de trabajo y energía de chorros y fluidos a álabes en movimiento se estudia como una aplicación de los principios de cantidad de movimiento. Cuando un chorro libre golpea un álabes liso que es curvo, el chorro se desvía, cambia su cantidad de movi-

miento y se ejerce una fuerza sobre el álabe. Se supone que el chorro fluye contra el álabe en dirección tangencial, sin choque y, más aun, se desprecia la resistencia de fricción entre el chorro y el álabe, se supone que la velocidad es uniforme en todo el chorro corriente arriba y corriente abajo del alabe, ya que éste está abierto al aire, mantiene la presión en cada extremo.



Figura. 5 Rueda Hidráulica Modelo (Diámetro 30 cm)

Según la teoría de los álbes, mientras mayor sea el ángulo de salida del chorro, mayor será la fuerza que impacta, no obstante si el ángulo de salida es  $180^\circ$  el chorro impactaría en el siguiente álabe. Así el ángulo de salida que está determinado en este sistema es  $150^\circ$  por que presenta facilidad en el desfogue del agua en la rueda. En la Tabla 3 se presentan valores de velocidades, diámetros, fuerza y fundamentalmente potencia y torque calculados en base a la variación de caudal de chorro incidente en la rueda hidráulica prototipo.

Tabla 4 Valores de velocidades, diámetros del chorro, Fuerza en el alabe, potencia y Torque generados en la Rueda hidráulica Prototipo.

Caudal	Altura neta	C1 velocidad de entrada en los álbes	u velocidad periférica rueda	n número de revoluciones de la rueda	diámetro del chorro	Fx fuerza tangencial	Potencia obtenida de la Rueda	Torque
(l/s)	Hn(m)	(m/s)	(m/s)	(rpm)	m	N	W	N*m
12,09	10,93	14,06	6,33	71,08	0,05	174,48	1103,88	148,30
14,20	10,91	14,05	6,32	71,00	0,05	204,62	1293,23	173,92
16,50	10,88	14,03	6,31	70,91	0,06	237,59	1499,69	201,95
19,03	10,85	14,00	6,30	70,80	0,06	273,44	1723,21	232,43
21,76	10,80	13,98	6,29	70,66	0,07	312,19	1963,52	265,37
24,73	10,75	13,94	6,27	70,49	0,07	353,85	2220,17	300,77

### 2.5.2 Diseño de un banco de pruebas

Para ensayar con estas ruedas se diseñó además un banco de pruebas a fin de asegurar el funcionamiento del prototipo. Para simular el chorro de agua con la energía suficiente provocada por el salto hidráulico se ha utilizado una bomba centrífuga con un rango de caudales de 25 a 50 l/min y un rango de presiones de 80 a 200 psi, ésta hace girar a la rueda permitiendo realizar la medición de las revoluciones mediante un tacómetro, el valor de la presión es registrada en el manómetro de agua con capacidad de 0 a 200 psi y la determinación del torque se determina mediante un freno, (ver figuras 6a y 6b.) ya que se obtiene la fuerza con la que dicha rueda se detiene durante el trabajo. La bomba centrífuga se acciona con un motor trifásico de 2 hp generando 1740 rpm.

Las tablas de resultados presentadas a continuación constan de los siguientes ítems.



Figura. 6 a) (izq.) Banco de pruebas de ruedas hidráulicas  
b) Rueda hidráulica y su dispositivo de frenado

*Código Rueda:* Se utilizaron códigos para las ruedas que constan de dos partes, el primer término se refiere al tipo de rueda con cierta forma de álabes, es decir, las de codificación de 1, 2 y 3, son de ángulo de salida del chorro de 150°, mientras las de codificación 4, 5 y 6, tienen el ángulo de salida de 135°. El segundo término en todas las ruedas hace referencia al número de álabes de cada rueda, así por ejemplo la rueda de codificación “1 – 20” es de 150° de ángulo de salida de chorro y de 20 álabes.

Mientras que una de codificación “4 – 22” es de 135° de ángulo de salida del chorro y 22 álabes.

*Angulo salida chorro:* Nomenclatura utilizada para indicar el ángulo de salida del chorro de agua del álabe. (grados).

*RPM Motor:* Indica el número de revoluciones por minuto que estuvo trabajando el motor de la bomba en el momento de las pruebas.

*RPM Rueda:* Indica el número de revoluciones por minuto que giró el eje del banco de pruebas al momento de su funcionamiento, este fue medido mediante un tacómetro digital, el error de medición del aparato es de 5 rpm.

*Diámetro inyector:* Indica el diámetro del inyector o salida del chorro antes del impacto con los álabes, aquí se construyeron dos inyectores, uno de 4 mm y otro de “\_” o su equivalente de 6,35mm. Se realizaron distintas pruebas a distintas presiones con cada uno de estos dos tipos.

*Caudal Total:* Hace referencia al caudal de salida de cada inyector, ya que al variar las presiones en las pruebas este es cambiante en cada estado.

*Fuerza Romana:* Fuerza F determinada accionando el resorte de medición (Balanza Romana) hasta que el sistema se detenga por completo.

*Fuerza en B:* Valor de la fuerza en el punto de la balanza romana y determinado mediante una ecuación.

*Torque Real:* Magnitud encontrada mediante la multiplicación de la fuerza en B por el radio del tambor, con la que posteriormente determinaremos la potencia del sistema con cada rueda.

*Potencia:* Resultado de aplicar (Ec.1), siendo esta la Potencia Teórica generada en el sistema.

$$P = T (2\pi n) / 60 \quad (\text{vatios}) \quad (1.1)$$

A continuación se presenta en la Tabla 1, los resultados obtenidos de la rueda modelo 1-20 en las pruebas realizadas en el banco con sus correspondientes variaciones en la presión

Tabla 1. Valores reales obtenidos en una rueda de 300mm de diámetro, con diámetro de inyector de 6,35 mm y ángulo de salida del chorro de 150°.

PRESIÓN [PSI]	50	45	40	35	30	25	20	15	10
Código Rueda	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20
Ángulo salida chorro	150°	150	150°	150°	150°	150°	150°	150°	150°
RPM Motor:	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534
RPM Rueda:	445	392	339	286	233	180	127	74	21
Dim. Inyector [mm]:	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Caudal Total [/s]:	0,27636	0,24642	0,23284	0,21122	0,1998	0,17394	0,16071	0,13027	0,12321
Fuerza Romana [Kg]:	1	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375	0,25		
FUERZA EN B [FB]	8,44505	7,73709	7,02914	6,32118	5,61323	4,90528	4,19732		
TORQUE REAL	0,55737	0,51065	0,46392	0,4172	0,37047	0,32375	0,27702		
POTENCIA [W]	25,9738	20,9622	16,4693	12,495	9,03944	6,10251	3,68424		

Los valores de Fuerza Romana en 10 y 15 PSI de presión no pudieron ser determinados en la prueba, ya que no se podía censar la fuerza de esta en la balanza, debido a que al actuar el peso del brazo del sistema de freno sobre el tambor, este se detenía, es decir la fuerza del chorro actuante sobre los álabes no producía un torque suficiente como para ser censado.

A continuación se presenta en la Tabla 2 los valores generados mediante el cálculo teórico o ideal, en la cual, en la última fila consta la eficiencia del banco de pruebas en base a lo real sobre lo teórico, teniendo en cuenta la eficiencia máxima del sistema.

Tabla 2. Valores ideales obtenidos por el cálculo en una rueda de 300mm de diámetro, con diámetro de inyector de 4 mm y ángulo de salida del chorro de 150°.

Presión	50PSI	45PSI	40PSI	35PSI	30PSI	25PSI	20PSI	15PSI	10PSI
H = mca	35,16	31,65	28,13	24,61	21,10	17,58	14,07	10,55	7,03
C1	23,62	22,40	21,12	19,76	18,29	16,70	14,94	12,93	10,56
U	10,63	10,08	9,50	8,89	8,23	7,51	6,72	5,82	4,75
n[rpm]	676,53	641,81	605,11	566,02	524,04	478,38	427,87	370,55	302,55
FUERZA DE LA RUEDA [N]	5,23	4,69	3,96	3,51	2,97	2,37	1,84	1,35	0,91
POTENCIA GENERADA EN LA RUEDA [W]	55,59	47,27	37,61	31,18	24,44	17,79	12,38	7,88	4,31
TORQUE FUERZA ROMANA EFICIENCIA	0,78	0,70	0,59	0,53	0,45	0,36	0,28	0,20	0,14
	1,62	1,40	1,11	0,92	0,71	0,46	0,25	0,05	-0,13
	0,97	0,86	0,90	0,76	0,78	0,75	0,67		

### 3. Resultados

Se construye una rueda hidráulica con paredes circulares de diámetro 1,7 m construida en plancha de acero de 3 mm, de espesor; que posea 24 álabes curvados con un radio de 17 cm (ver figura 10), y con los elementos necesarios para la sujeción y la suspensión a una altura del suelo de 20 cm, girará a 70 revoluciones por minuto, cuando se dispare un chorro de agua conducida por una tubería de polietileno PE de 4 pulgadas de diámetro, desde el embalse hasta la rueda, este giro poseerá la suficiente energía proveniente tanto de la incidencia del chorro de agua como de la inercia de la masa de la rueda, llegando a presentar valores de potencia de hasta 2220 W y un torque de hasta 300,77 Newton x metro; suficiente para hacer funcionar un pistón de doble efecto de un diámetro de 50 mm, y una longitud de carrera de 135 mm, mismo que tomará 0,26 litros de volumen para ser empujado cada vez que gire una vuelta la rueda hidráulica. Con lo que el objetivo de este prototipo queda cumplido.



Fig. 10 Rueda Hidráulica Prototipo de un diámetros de 1,7 m.

Por otra parte, hemos de tomar en cuenta que el costo inicial de estos sistemas está por el orden de los 6 mil dólares (considerando costo de equipos y materiales para montaje y puesta a punto en el sitio), y el costo de mantenimiento de los equipos es relativamente bajo, por lo tanto si existiera la posibilidad de organizar a ciertos grupos de personas que puedan beneficiarse almacenando agua para riego para sus cultivos, en desniveles de hasta 120 metros desde la toma de agua, se podría financiar dichos costos iniciales y el beneficio sería alto ya que no requiere de inversión adicional en energía para su funcionamiento.

#### **4. Discusión**

Las tecnologías de energía renovable, como el caso de los sistemas de bombeo mediante rueda hidráulica, construidos a pequeña escala presentan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de agua para riego a comunidades rurales remotas que no posean la capacidad eléctrica instalada.

Al analizar cada uno de los elementos que se requieren para el buen funcionamiento de este tipo de sistema de bombeo, se concluye que es factible el bombeo de agua en desniveles de hasta 120 metros con una alimentación de caudal de hasta 0,4 l/s; sin embargo, el limitante seguirá siendo la captación de agua con caídas de entre 5 y 10 m, y un caudal constante

que oscile entre 15 a 25 [l/s] como un rango mínimo para el funcionamiento

## 5. Recomendaciones

Este tipo de proyectos requieren de continuidad, es decir no se puede afirmar que está concluido el proyecto de investigación por cuanto existen muchas más actividades como construir un sistema desarenador y la instalación de tubería de carga (salto hidráulico = 10 metros), en el Campus Juan Lunardi sector Yumacay, para la toma de agua del depósito natural de acumulación de agua que se posee en el sitio, además es importante construir una plataforma de hormigón, con depósito (toma de agua para la succión) y canal de retorno al riachuelo; para el anclaje de las base que sujetarán a la rueda hidráulica. La instalación de la tubería de polietileno de diámetro 1/2 de pulgada, para la descarga de agua para riego sería de gran ayuda en la zona, y por último la construcción de un depósito de acumulación de agua en el nivel 120 metros, ubicado en las faldas de la montaña, mismo que servirá para el almacenamiento de agua para el riego.

## Bibliografía

NORTON, Robert L.

1999 *Diseño de Máquinas*, Edit. Prentice Hall, Primera Edición, México, 1080 p.

ERDMAN, Arthur G., Sandor, George N.

1998 *Diseño de Mecanismos*, Edit. Prentice Hall, Tercera Edición, México, 664 p.

SHIGLEY, Joseph E., Mischke Charles R.

2002 *Diseño en Ingeniería Mecánica*, Editorial McGraw-Hill, Sexta Edición, 1258 p.

BEER, Ferdinand P., Johnston, E. Russell

2000 *Mecánica de Materiales*, Edit. McGraw-Hill, Tercera Edición.

1998 Catálogo de Rodamientos de Bolas y de Rodillos NTN.

AGUERA, Soriano José

2003 *Mecánica de Fluidos Incompresibles y Turbomáquinas Hidráulicas*, Quinta Edición, 705 pg.

STREETER, Victor L.

2000 *Mecánica de Fluidos*, Edit. McGraw-Hill, Novena Edición, 752 p.

HERNÁNDEZ, Roberto

1996 *Metodología de la Investigación*, Edit. Mc.Graw-Hill, México.

MERINO de Diego, Amparo

2007 *La Gestión del Agua de Riego*, Edit. Días de Santos, 319 p.

**Páginas de internet**

1. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia10.pdf>
2. [http://www.gea.usm.cl/archivos/inv\\_bombeosinconstosGEA.pdf](http://www.gea.usm.cl/archivos/inv_bombeosinconstosGEA.pdf)
3. [www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com)
4. <http://www.angelfire.com/emo/tomaustin/Met/metinacap.htm>
5. <http://www.presidencia.gov.ec/modulos.asp?id=14>
6. <http://www.cenace.org.ec/>
7. <http://www.mer.gov.ec/pagina/ministerio.h>

# 12

## Diseño y construcción de un prototipo modular de una microcentral hidroeléctrica estacionaria con turbina tipo Pelton

Paúl Álvarez<sup>1</sup>, Cristian Arias<sup>2</sup>, Edwin Bustamante<sup>2</sup>

### 1. Introducción

Uno de los principales recursos naturales con los que cuenta nuestro país es el hídrico, mismo que está siendo aprovechado para la generación de energía eléctrica a través de proyectos como la Central Hidroeléctrica Paute, Agoyán, San Francisco entre los más importantes; sin embargo, no abastece en totalidad la demanda de energía que tiene el país, teniendo inclusive que comprar energía a países vecinos para cubrir las demandas existentes en los últimos años. Además, cabe mencionar que los grandes proyectos de generación eléctrica mediante centrales hidráulicas quedan supeditadas a que exista la red de suministro eléctrico en el lugar donde se requiera energía, pero lugares ricos en potencial hidroeléctrico como en el Oriente ecuatoriano, o zonas rurales en la sierra y costa ecuatoriana son de difícil acceso y la red eléctrica resulta de muy costosa implementación; lo que en otras palabras significa que las comunidades de estas regiones difícilmente tienen acceso al servicio eléctrico a pesar de su potencial de generación de energía.

---

1 Director del proyecto de investigación, Docente de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana.

2 Egresados de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana.

A partir de estos antecedentes, las comunidades antes mencionadas únicamente podrán tener acceso a energía eléctrica si se instalan pequeñas centrales hidráulicas, o alguna otra fuente de energías renovables como paneles fotovoltaicos o centrales eólicas; así, nuestro proyecto se basa en la necesidad de diseñar y construir un prototipo de turbina capaz de generar energía suficiente para abastecer el suministro eléctrico a una o varias casas de estas comunidades, de tal manera que el prototipo diseñado, pueda adaptarse a diversas condiciones de caudales y alturas de acuerdo a la zona donde se emplace, que tenga un bajo costo, que sea de fácil construcción y además de mantenimiento mínimo.

Cabe mencionar que el tipo de turbina que mejor se adapta a las condiciones antes mencionadas es la turbina tipo Pelton, razón por la cual ha sido escogida como punto de partida para el proyecto de investigación.

Con este diseño, se responderá a inquietudes como el costo de implementar una microcentral hidráulica, la adaptación del prototipo a las condiciones geográficas, las eficiencias que se pueden lograr en base a la tecnología disponible y el importante tema de la relación costo-beneficio para conocer si se pueden realizar una producción en serie.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Análisis de caudales y alturas disponibles**

Previo a la fase de diseño, se analizaron las diferentes condiciones geográficas con las que cuenta nuestro país en lo que respecta a recursos hídricos ubicando un lugar determinado en el que funcionaría el proyecto, para realizar pruebas en el mismo, este punto se encuentra ubicado en el cantón Paute de la provincia del Azuay, en la quebrada Yumacay, específicamente en el campus Juan Lunardi de la Universidad Politécnica Salesiana.

En esta quebrada se instaló un vertedero triangular con el fin de determinar un caudal promedio en el periodo del año y así tener un parámetro de diseño del prototipo, además la quebrada contaba con el desni-

vel necesario que se utilizaría como caída bruta para lograr la altura, estos datos se determinaron por dos métodos: el primero se lo realizó utilizando una manguera de nivelación, que tiene una aproximación del 5% y el segundo método es mediante la utilización de un GPS.

A continuación, en la Tabla 1 se presentan los datos obtenidos de mediciones de altura de vertedero y caudal disponible en la quebrada durante 8 meses, se puede apreciar que los caudales logran su máximo en el mes de julio con 81,10 l/s que significa además una altura máxima de 32 cm, y después disminuyen paulatinamente hasta un mínimo de 6,98 l/s a una altura de 12 cm.

Tabla 1. Datos de la altura del desnivel y caudales aforados en la quebrada tomados en 8 meses

	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Altura [cm]	18,5	20	28	26	22	18	22	14
	19	20	32	22	22	15,5	22	12
		22	32	21	22	22,5	21	
		22,5	30	19,5	22,5	22,5	17	
Caudal (l/s)	20,61	25,04	58,08	48,26	31,78	19,24	31,78	10,27
	22,03	24,04	81,10	31,78	31,78	13,24	31,78	6,98
		37,78	81,10	28,29	31,78	33,62	28,29	
		33,62	69,01	23,51	33,62	33,62	16,68	
					28,29	31,78		

Una vez tomados estos datos se procedió al diseño hidráulico basándose en conceptos de Turbomáquinas hidráulicas, mientras que en el diseño mecánico se manejaron conceptos de ensayo y resistencia de materiales. La fase de simulación se llevó a cabo con un software especializado CAD.

## 2.2 Diseño hidráulico

Se procedió al diseño hidráulico basándose en conceptos de Turbomáquinas hidráulicas, se trabajó con una ASNM (altura sobre el nivel del mar) en la zona de 2.220 m y al final de la tubería de presión de

2190 m, a pesar de estas alturas la frecuencia de los caudales que se logra es muy pequeña, tal como muestra la figura 1

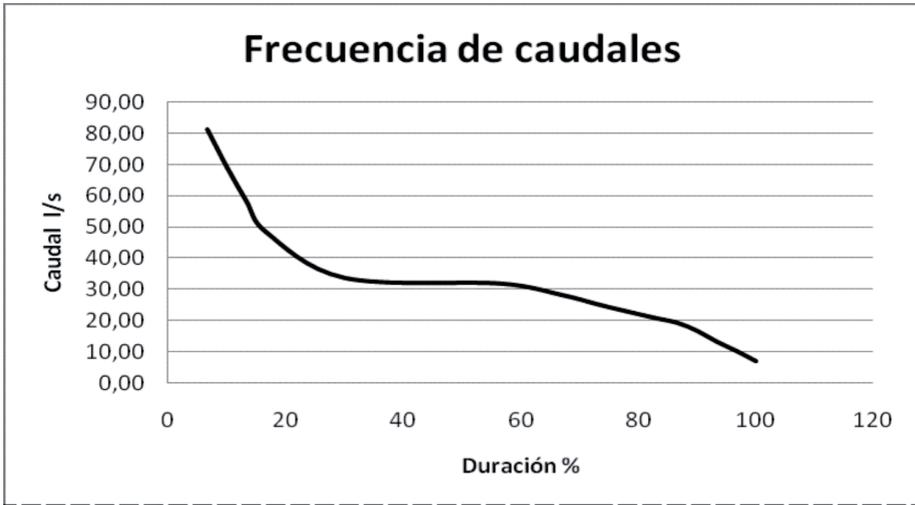


Fig. 1 Caudales de la quebrada en función de su porcentaje de duración

Para que la microcentral trabaje el 100% de tiempo a plena carga, el caudal de diseño fue muy pequeño, sin embargo como se requiere que trabaje a un 70% de tiempo a plena carga, el caudal de diseño disponible inclusive sobrepasa lo requerido.

Estadísticamente, se encuentra que el caudal de mayor frecuencia es de 10 l/s, con este valor se realiza el diseño ya que se quiere que la central trabaje a la máxima carga posible aproximadamente un 100 % de su capacidad total. En el diseño, para que la microcentral trabaje con un caudal de 10 l/s se estima una duración de potencia generada en un 96%, tal como muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculos de energía obtenidos en base a la altura del vertedero ubicado en Paute

Altura [cm]	Caudal [l/s]	Potencia relativa [kW]	Duración [%]	Energía [kWh x 10 <sup>3</sup> ]
32	81,10	16,9	6,7	9869
30	69,01	14,4	10,0	12598
28	58,08	12,1	13,3	14136
26	48,26	10,1	16,7	14681
22,5	33,62	7,0	30,0	18410
22	31,78	6,6	56,7	32875
21	28,29	5,9	66,7	34430
20	25,04	5,2	73,3	33524
19,5	23,51	4,9	76,7	32898
19	22,03	4,6	80,0	32170
18,5	20,61	4,3	83,3	31350
18	19,24	4,0	86,7	30445
17	16,68	3,5	90,0	27406
15,5	13,24	2,8	93,3	22561
14	10,27	2,1	96,7	18117
12	6,98	1,5	100,0	12748

## 2.3 Cálculos hidráulicos

Los cálculos hidráulicos nos sirven para determinar o dimensionar todos y cada uno de los elementos del prototipo, a partir de caudales y alturas disponibles.

### 2.3.1 Inyector

Tal como muestra la Tabla 3, las dimensiones de la tobera o inyector están en función del diámetro del chorro que actúa en la turbina y corresponden a las mostradas en la figura 2.

Tabla 3. Proporciones de la tobera en función del diámetro

A		0,0369	M
	40 - 60	45	grados
	60 - 90	70	grados
		0,0286	M
		0,013	M
		0,015	M
		0,0845	M
		0,117	M
		0,156	M
		0,39	M
		0,065	M

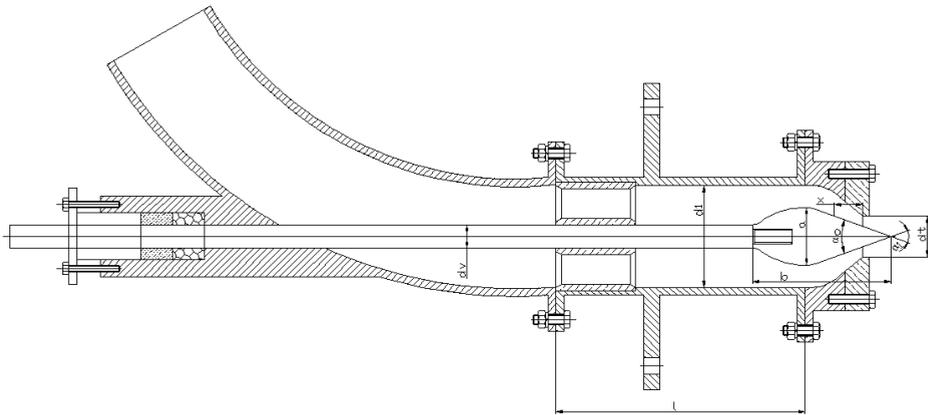


Figura 2. Diseño de la tobera con las dimensiones descritas

### 2.3.2 Álabes

A continuación, en la Tabla 4 se presentan las dimensiones de la geometría del álabes del rodete Pelton, correspondientes a las mostradas en la figura 3.

Tabla 4. Dimensiones de la cuchara en función del diámetro

$B$		0,078	$M$
$L$		0,0728	$M$
$D$		0,0234	$M$
$f$		0,0234	$M$
$M$		0,026	$M$
$e$		0,0117	$M$
		15°	grados
		16°	grados
		0,041	$M$
		5°	grados
		13°	grados

Cuchara de una turbina Pelton

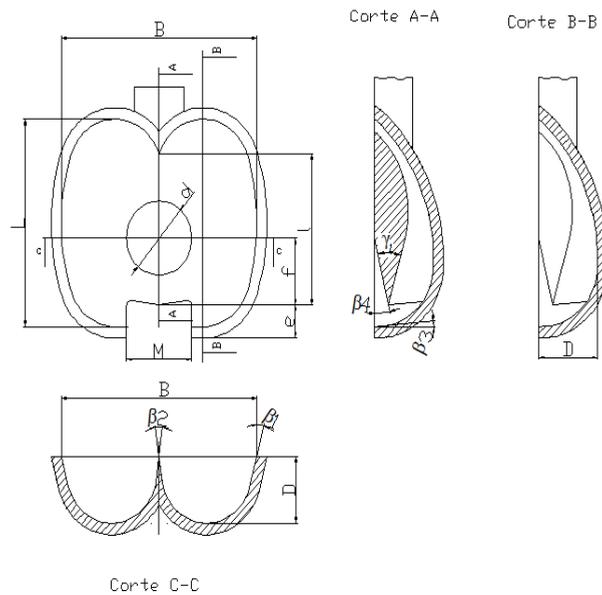


Figura 3. Diseño del álabe con las dimensiones descritas

El análisis del rodete de la turbina nos arroja datos de suma importancia para la construcción del mismo, de estos resultados destacamos el número de álabes o cucharas de la turbina, este número puede variar de 17 a 19 álabes según la relación de diámetros de la turbina con el diámetro del chorro del inyector, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos logrados de la geometría del rodete.

Diámetro de paso del rodete	0,216 [m]
Relación de diámetros	0,12
Relación de diámetros	8,.
Diámetro máximo de la turbina	0,263 [m]
Paso máximo de las cucharas	0,040 [m]
Número teórico de cucharas	17
Número máximo de cucharas	19

## 2.4 Diseño mecánico de la turbina

Se realizó el diseño utilizando criterios de resistencia de materiales, con la finalidad de que los dispositivos del equipo no fallen el momento de que se ponga en marcha el conjunto de la turbina, logrando los datos mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos de diseño y cálculo del rodete

Esfuerzo tangencial (FH)	423,24 [N]
Esfuerzo radial centrífuga	328,2 [N]
El momento flector máximo	37,58 [N*m]
El esfuerzo de flexión	66,63 [MPa]
Esfuerzo cortante promedio	4,52 [MPa]
Esfuerzos en el apoyo del vástago del álabe	2,52 [MPa]

Asimismo en el análisis de cargas por fatiga se encontró un componente medio de 46,58 MPa, un componente alternante de 19,9 MPa, resistencia a la fatiga de 151,5 MPa y un factor de seguridad a la fatiga de 7,3.

## 2.5 Cálculo y diseño del eje

El eje de la turbina al ser uno de los componentes más importantes del equipo se construyó de acero inoxidable debido a su alta resistencia a la corrosión ya que funcionará totalmente sumergido en agua. Los datos logrados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos del cálculo y diseño del eje

Fuerza que ejerce el chorro sobre la turbina	133,15 [N]
Fuerza en x	18,4 [N]
Fuerza en y	134,98 [N]
Fuerza resultante	239,49 [N]
Reacciones	115,22 [N]
Torque máximo	28,76 [N.m]
Resistencia a la fatiga	322,5 [MPa]
Deflección máxima del eje	0,202 [mm]
Factor de seguridad	4,6
Velocidad crítica	2100 [rpm]
Velocidad de empalamiento	1710 [rpm]

## 2.6 Sistema de transmisión

El diseño y cálculos del sistema de transmisión se presenta en la Tabla 8, con estos datos se logra una eficiencia del sistema de un 96%.

Tabla 8. Diseño y cálculo del sistema de transmisión del movimiento.

Relación de transmisión	1,4
D1	0,4 [m]
D2	0,1 [m]
Velocidad periférica	19,15 [m/s]
Distancia entre centros	0,355 [m]
Longitud de banda	1,57 [m]
Número de bandas	1

## 2.7 Pruebas

Se realizaron pruebas para determinar el comportamiento de la turbina mediante modelos hidráulicos, con estas pruebas determinamos como varían los diferentes parámetros para llegar a un óptimo rendimiento, mientras se disminuía el diámetro del rodete de la turbina: el rendimiento hidráulico y las revoluciones por minuto (rpm) aumentaban, mientras el caudal y la potencia disminuían; estos datos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Variación del rendimiento hidráulico, el caudal, la potencia y las rpm en función del diámetro del rodete de la turbina

Diámetro del rodete [m]	Rendimiento hidráulico	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Potencia [kW]	rpm
0,53	0,690	0,0489	6,53	300
0,44	0,695	0,034	4,53	360
0,35	0,70	0,0217	2,9	450
0,26	0,71	0,0122	1,63	600
0,17	0,717	0,00544	0,72	900
0,088	0,732	0,00136	0,18	1800

Al realizar las pruebas de la turbina sin carga o al vacío, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 10 y graficados en la figura 4, donde se muestra claramente las variaciones de la altura, caudal, apertura del inyector y revoluciones por minuto al aumentar el voltaje.

Tabla 10. Resultados de las pruebas sobre la turbina sin carga

Voltaje	Altura	Presión	Caudal	Apertura inyector		N (Turbina)	N (Generador)
				vueltas	%	rpm	Rpm
V	m	Psi	m_/s				
68	19,53	13,0534	0,008	10	100	450	1862
81	19,53	13,0534	0,008	9,5	95	481	1964
85	19,53	13,0534	0,008	9	90	500	2040
91	21,57	15,954	0,0075	8,5	85	521	2111
96	22,60	17,404	0,0073	8	80	545	2236
102	23,62	18,854	0,0070	7,5	75	575	2331
112	25,66	21,755	0,0064	7	70	820	3306
112	25,66	21,755	0,0064	6,75	67,5	872	3572
112	26,69	23,206	0,0061	6,5	65	904	3674

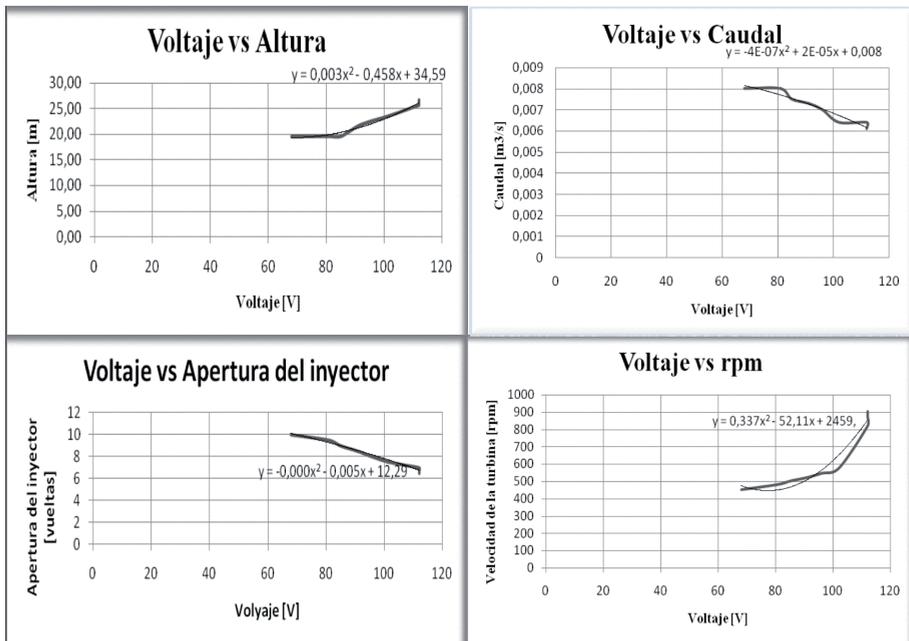


Figura 4. Variaciones de los principales parámetros de la turbina en período de prueba en función del aumento del voltaje.

Para mantener estable tanto el número de revoluciones de la turbina como el voltaje y la potencia que puede dar el generador eléctrico, se debe mantener constante el caudal y altura de ingreso a la turbina; durante las pruebas que se realizaron se variaba el ingreso de caudal y la presión con valores inferiores a los de diseño debido a que las características de funcionamiento de la bomba no permitían cumplir con los parámetros de diseño.

Durante las pruebas se determinó que para alcanzar el número de revoluciones de diseño de la turbina el recurso hídrico debía ser de 26 m de caída neta y un caudal de 1,5 l/s, considerando que estas pruebas se realizaron sin conectarle carga alguna al generador, ya que al consumir la potencia generada decaen las revoluciones de la turbina, ese fenómeno se presentó al no tener el caudal requerido de diseño, por lo tanto al momen-

to de realizar las pruebas con carga se aumentó la presión de entrada del chorro para compensar la disminución de caudal.

### 2.8 Pruebas de la turbina conectada una carga eléctrica

Una vez realizado el ajuste de la tabulación de datos obtenidos en la prueba de la turbina acoplada a un generador eléctrico y, a su vez, conectada una carga de eléctrica con una potencia de consumo de 1100 W, se obtuvo como resultado que la potencia aparente máxima que se genera es 2268 VA, la misma se modifica al multiplicar por el factor de potencia de la carga eléctrica conectada ( $\cos \phi = 0,98$ ) y el rendimiento eléctrico del generador obtenemos una potencia efectiva 2001 W, estos datos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de las pruebas con carga

Altura	Presión	Caudal	Apertura inyector	N (Turbina)	N (Generador)	Voltaje	Corriente	Potencia aparente	Cos
<i>m</i>	<i>Psi</i>	<i>m<sub>3</sub>/s</i>	%	<i>Rpm</i>	<i>rpm</i>	<i>V</i>	<i>I</i>	<i>VA</i>	
17,47	10,15	0,0084	100	302	1206	37	2,8	112	0,99
17,47	10,15	0,0084	95	309	1251	39	2,93	124,4	0,99
18,49	11,60	0,0082	90	318	1298	40	3,04	134	0,99
19,00	12,33	0,0081	85	325	1323	42	3,15	143	0,99
19,51	13,05	0,008	80	333	1331	44	3,27	154	0,99
20,53	14,50	0,0078	75	342	1376	46	3,4	172	0,99
21,55	15,95	0,0075	70	349	1413	48	3,6	184	0,99
22,57	17,40	0,0073	65	360	1448	51	3,8	208	0,99
24,61	20,31	0,0067	60	375	1495	53	4,03	224	0,99
25,63	21,76	0,0064	55	386	1558	56	4,25	260	0,99
28,68	26,11	0,0055	50	406	1598	60	4,5	292	0,99
34,80	34,81	0,0033	40	445	1803	69	5,2	386,8	0,99

Realizado el ajuste de curvas del número de revoluciones de la turbina y el generador se determinó que si se cumplió con la capacidad de generación eléctrica cuando la turbina alcance girar a 900 rpm, con una altura neta de 25 m y 1 l/s.

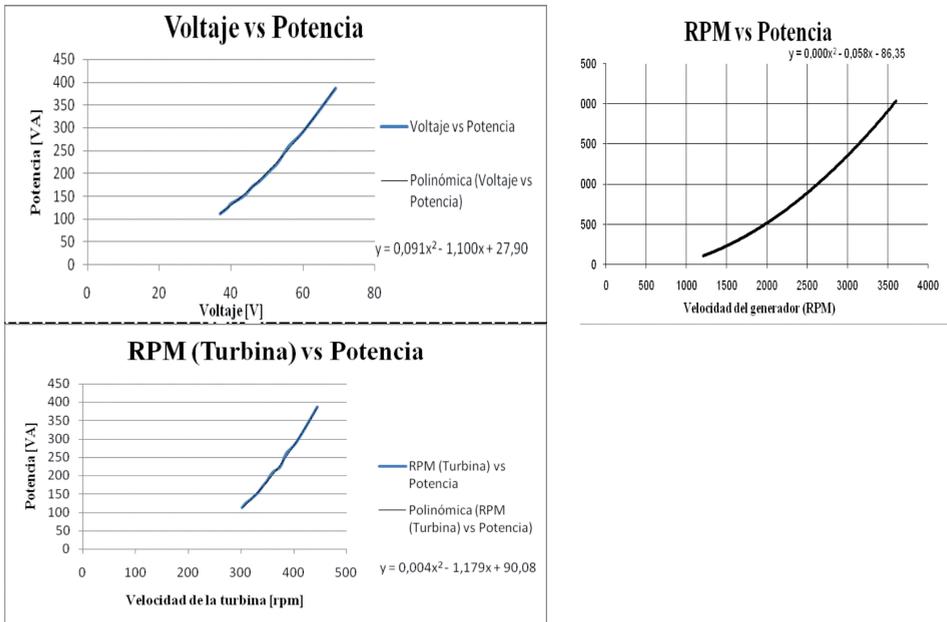


Figura 5. Gráficas de la variación de los parámetros de la turbina con carga.

## 2.9 Construcción

Para la etapa de construcción, se realizó una investigación de materiales y tecnologías disponibles en el medio, obteniendo como resultados procesos de mecanizado mediante arranque de viruta, procesos de fundición en arena y procesos de soldadura por arco voltaico.

Los materiales utilizados en el equipo son fundición de bronce, acero inoxidable, plancha negra A36 y acero St 37. Para que se transmita el movimiento hasta el generador eléctrico utilizamos un sistema de reducción mediante poleas.

### 3. Análisis de costos

#### 3.1 Costo de construcción de la microcentral

Se realizó una cuantificación de los componentes utilizados tanto en la construcción de la microcentral como en el equipo para realizar las pruebas correspondientes. A continuación presentamos un cuadro de los componentes utilizados en el proyecto en la Tabla 12.

Tabla 12. Costo de construcción del equipo

Denominación	Valor Total
Generador 2,5 kW	\$ 313,60
Modelo de aluminio	\$ 380,80
Fundición de cucharas	\$ 168,00
Tornillería Inoxidable	\$ 48,44
Aceros para inyector y turbina	\$ 200,54
Carcasa	\$ 232,96
Transmisión	\$ 44,26
Inyector	\$ 87,63
Prensaestopas y empaques	\$ 18,04
Pernos inoxidables para turbina	\$ 30,69
Balanceo de turbina	\$ 20,00
Material estructural	\$ 66,21
Accesorios	\$ 120,65
Bomba centrífuga	\$ 538,08
Instalación eléctrica	\$ 144,68
Pintura	\$ 41,31
Construcción mano de Obra	\$ 50,40
Varios	\$ 78,87
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 2.585,16</b>

En la Tabla 12 constan los valores de los materiales y servicios que se necesitaron para construir la microcentral hidroeléctrica y el banco de pruebas de la misma.

#### 3.2 Elaboración del cuadro de flujo de caja interno

En la Tabla 13 se muestra una estimación de la inversión realizada en esta microcentral hidroeléctrica de 2kW. La mano de obra se ha estimado un valor para tener un monto inicial cerrado.

Tabla 13. Inversiones en la microcentral hidroeléctrica

Inversiones	Total US\$	año 1 US\$	
		3 mes	6 mes
Equipo mecánico	1.187,10	1.187,10	-
Equipo eléctrico	1.040,62	-	1.040,62
Banco de pruebas	278,57	-	278,57
Varios	78,87	-	78,87
Mano de obra	414,84	-	414,84
TOTALES	3.000,00	1.187,10	1.812,90

Tenemos otros datos que nos son de gran ayuda como los costos de operación y mantenimiento anual en el caso de que la microcentral hidroeléctrica sea implementada, este costo será de US\$ 2.040.

### 3.3 Determinación de los beneficios

Conociendo la venta en kilowatios-hora de energía en los periodos anuales, los ingresos por venta de energía se calculan con la energía que se proyecta vender a partir del segundo año. Para determinar el monto de los ingresos, se asume un costo por kWh, el cual puede variar de 6 a 15 centavos de dólar, tomándose los valores más altos para microcentrales con potencia menores de 100 kW (Manual IDTG, 2000), estos datos se presentan en la Tabla 15.

Tabla 14. Ingreso por venta de energía a US\$ 10¢ el kWh

años	Venta de energía en kWh	Ingreso por venta de energía US\$
2-4	19710	1971
5-7	29565	2956,5
8-10	39420	3942
11-13	49275	4927,5
14-16	59130	5913

### 3.4 Flujo de caja interno

Tabla 15. flujo de caja interno (en US\$)

Año	BENEFICIOS			COSTOS			Flujo de caja
	Valor energía	Valor residual	Benef. Total	Invers.	Operac. y Mantenimiento.	Costo total	
1	—		0	3000		3000	-3000
2	1971		1971		2040	2040	-69
3	1971		1971		2040	2040	-69
4	1971		1971		2040	2040	-69
5	2956,5		2956,5		2040	2040	916,5
6	2956,5		2956,5		2040	2040	916,5
7	2956,5		2956,5		2040	2040	916,5
8	3942		3942		2040	2040	1902
9	3942		3942		2040	2040	1902
10	3942		3942		2040	2040	1902
11	4927,5		4927,5		2040	2040	2887,5
12	4927,5		4927,5		2040	2040	2887,5
13	4927,5		4927,5		2040	2040	2887,5
14	5913		5913		2040	2040	3873
15	5913		5913		2040	2040	3873
16	5913	357,5	6270,5		2040	2040	4230,5

### 3.5 Cálculo de los indicadores del análisis beneficio-coste

#### 3.5.1 VAN (*Valor Actual Neto*)

Por Valor Actual Neto de una inversión se entiende la suma de los valores actualizados de todos los flujos netos de caja esperados del proyecto, deducido el valor de la inversión inicial. Si un proyecto de inversión tiene un VAN positivo, el proyecto es rentable, el proyecto es más rentable cuando el VAN es más alto. El procedimiento para su cálculo se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Procedimiento de cálculo del VAN

Año	Flujo de caja	Tasa 5%		Tasa 1%	
		Factor del valor actual	VANE 5%	Factor del valor actual	VANE 1%
1	-3	0,9524	-2,86	0,9901	-2,97
2	-0,069	0,907	-0,06	0,9803	-0,07
3	-0,069	0,8638	-0,06	0,9706	-0,07
4	-0,069	0,8227	-0,06	0,961	-0,07
5	0,9165	0,7835	0,72	0,9515	0,87
6	0,9165	0,7462	0,68	0,9421	0,86
7	0,9165	0,7107	0,65	0,9327	0,85
8	1,902	0,6768	1,29	0,9235	1,76
9	1,902	0,6446	1,23	0,9143	1,74
10	1,902	0,6139	1,17	0,9053	1,72
11	2,8875	0,5847	1,69	0,8963	2,59
12	2,8875	0,5568	1,61	0,8875	2,56
13	2,8875	0,5303	1,53	0,8787	2,54
14	3,873	0,5051	1,96	0,87	3,37
15	3,873	0,481	1,86	0,8614	3,34
16	4,2305	0,4581	1,94	0,8528	3,61
		VANE:	13,28	VANE:	22,64

### 3.5.2 TIR (Tasa Interna de retorno)

Se denomina Tasa Interna de Rentabilidad o Retorno (TIR) a la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de una inversión sea igual a cero. ( $VAN = 0$ ), así este método considera que una inversión es aconsejable si la TIR resultante es igual o superior a la tasa exigida por el inversor, y entre varias alternativas, la más conveniente será aquella que ofrezca una TIR. mayor. La gráfica donde se presenta este análisis es la figura 6.

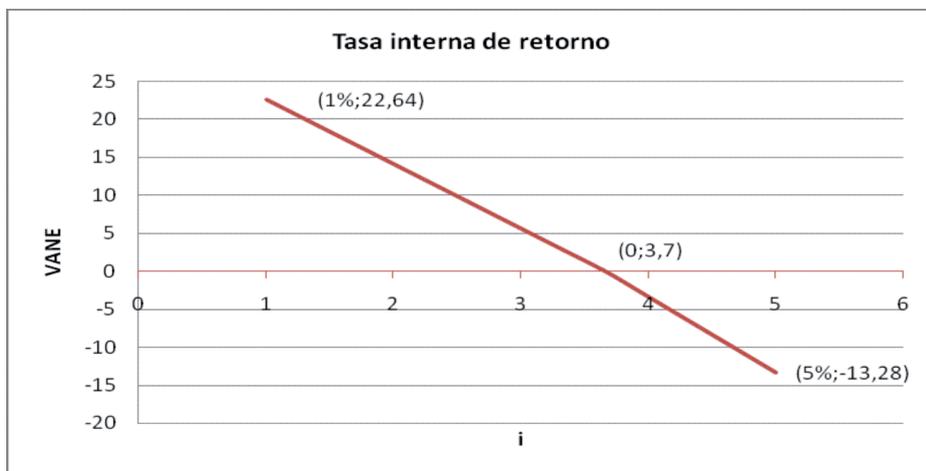


Fig. 6 Tasa interna de retorno

Del flujo de caja realizado en la Tabla 16 se obtiene un TIR de un 25% y un VAN de 7,41 USD. Al analizar el valor actual neto económico con una inversión inicial de 3000 USD se obtiene un VANE (5%) de 24,64 y un VANE (1%) de 13,28.

### 3.6 Costo unitario de la energía: el Factor del Valor Actual

Es el factor de pago único a la tasa de descuentos o interés que se haya seleccionado, para este caso seleccionamos 4%, el análisis se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Cálculo del costo del kWh en USD

Año	COSTOS			ENERGÍA			Costo del kWh US\$
	Costo total anual	Factor del valor actual	Valor actual costo	Miles de kWh vendidos	Factor del valor actual	Valor actual energía miles kWh	
1	3	1,9615	5,88				
2	2,04	1,8861	3,85	19,71	0,9246	18,22	
3	2,04			19,71	0,889	17,52	
4	2,04			19,71	0,8548	16,85	
5	2,04			29,57	0,8219	24,30	
6	2,04			29,57	0,7903	23,37	
7	2,04			29,57	0,7599	22,47	
8	2,04	10,1569	20,72	39,42	0,7307	28,80	
9	2,04			39,42	0,7026	27,70	
10	2,04			39,42	0,6756	26,63	
11	2,04			49,28	0,6496	32,01	
12	2,04			49,28	0,6246	30,78	
13	2,04			49,28	0,6006	29,59	
14	2,04			59,13	0,5775	34,15	
15	2,04			59,13	0,5553	32,83	
16	1,68	0,5339	0,90	59,13	0,5339	31,57	
			31,35			396,79	0,079

#### 4. Resultados

Se logró la construcción de una microcentral hidroeléctrica acoplada a un generador eléctrico y conectada una carga de eléctrica con una potencia de consumo de 1100 W, logrando así una potencia generada efectiva de 2001 W. Esta generación eléctrica se cumple cuando la turbina alcanza las 900 rpm, con una altura neta de 25 m y un caudal de 1 l/s. Esta microcentral fue completamente construida con tecnología y materiales disponibles en el Ecuador, y adaptada a la hidrografía de la quebrada Yumacay inclusive dentro del Campus Universitario Juan Lunardi.

El proyecto de construir una mini central hidráulica es factible desde el punto de vista económico, obteniendo como resultados un VAN mayor que cero y un TIR de 25%.

## 5. Discusión

Los análisis de la geografía e hidrografía realizados en el país y sobre todo en lugares carentes de energía eléctrica demuestran que es factible colocar pequeñas centrales hidráulicas para abastecer de electricidad a diferentes comunidades, por lo cual es importante que se siga incentivando este tipo de propuestas de energías limpias ya que el prototipo diseñado se puede adaptar a diferentes capacidades de caudal y altura que irían desde los 3 l/s y 34 m de altura de presión hasta 10 l/s y 17 m de altura de presión.

Además se probó que uno de los materiales más eficientes, en resistencia y durabilidad, además de lo económico y de fácil acceso, para la construcción del prototipo fue el bronce, sin embargo queda pendiente hacer un estudio de álabes y rodete en base a materiales poliméricos que podrían ser mas económicos y eficientes.

## Bibliografía

### CONAM

- 2003 Informe del Taller Regional Amazónico de presentación y consulta del PRO-MEC con organizaciones sociales, indígenas y campesinas realizado en Tena, del Consejo Nacional de Modernización, 23-24.

### ITDG

- 2000 *Manual de mini y microcentrales hidráulicas: Una guía para el desarrollo de proyectos*. Perú.

### Páginas Web

Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC). Ecuador. Plan Nacional de Electrificación (2006-2015). Consultada el lunes 2 de octubre del 2006.

Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC). Ecuador. Estadística del sector eléctrico ecuatoriano. Primer semestre del año 2006.

Centro de Estudios y Datos (CEDATOS). Página de Internet [www.cedatos.com](http://www.cedatos.com). Consultada el martes 3 de octubre de 2006.

Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía. [www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_631\\_energía\\_minihidraulic#](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_631_energía_minihidraulic#)

[www.unesco.org/phi/libros/microcentrales/arrieta.html](http://www.unesco.org/phi/libros/microcentrales/arrieta.html).

- Cálculos y diseños hidráulico-estructurales en minicentrales hidroenergéticas.  
[www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/csuarez.html](http://www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/csuarez.html).
- Microcentrales Hidroeléctricas en Venezuela. [www.monografias.com](http://www.monografias.com)
- Programa de minicentrales para las regiones australes de Chile. [www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/alvarez.html](http://www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/alvarez.html).
- Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía. [www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_631\\_energía\\_minihidraulic#](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_631_energía_minihidraulic#)
- Experiencias en el campo de las microcentrales hidroeléctricas. [www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/mucker.html](http://www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/mucker.html).
- ITDG (Intermediate Technology Development Group, Memoria Anual de Soluciones prácticas (abril 02 - marzo 03) Oficina Regional para América Latina.  
[www.itdg.org.pe](http://www.itdg.org.pe)
- [www.medioambienteonline.com/site/root/resources/case\\_study/4171.html](http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/case_study/4171.html)
- Informe de la organización Soluciones prácticas – ITDG desarrolladas en el Perú  
[www.undp.org/sgp/download/document/LatinAmerica/Peru%20CPS.rtf](http://www.undp.org/sgp/download/document/LatinAmerica/Peru%20CPS.rtf)
- Mataix Claudio: Turbomáquinas Hidráulicas, Ed, McGraw-Hill, Barcelona, 1985