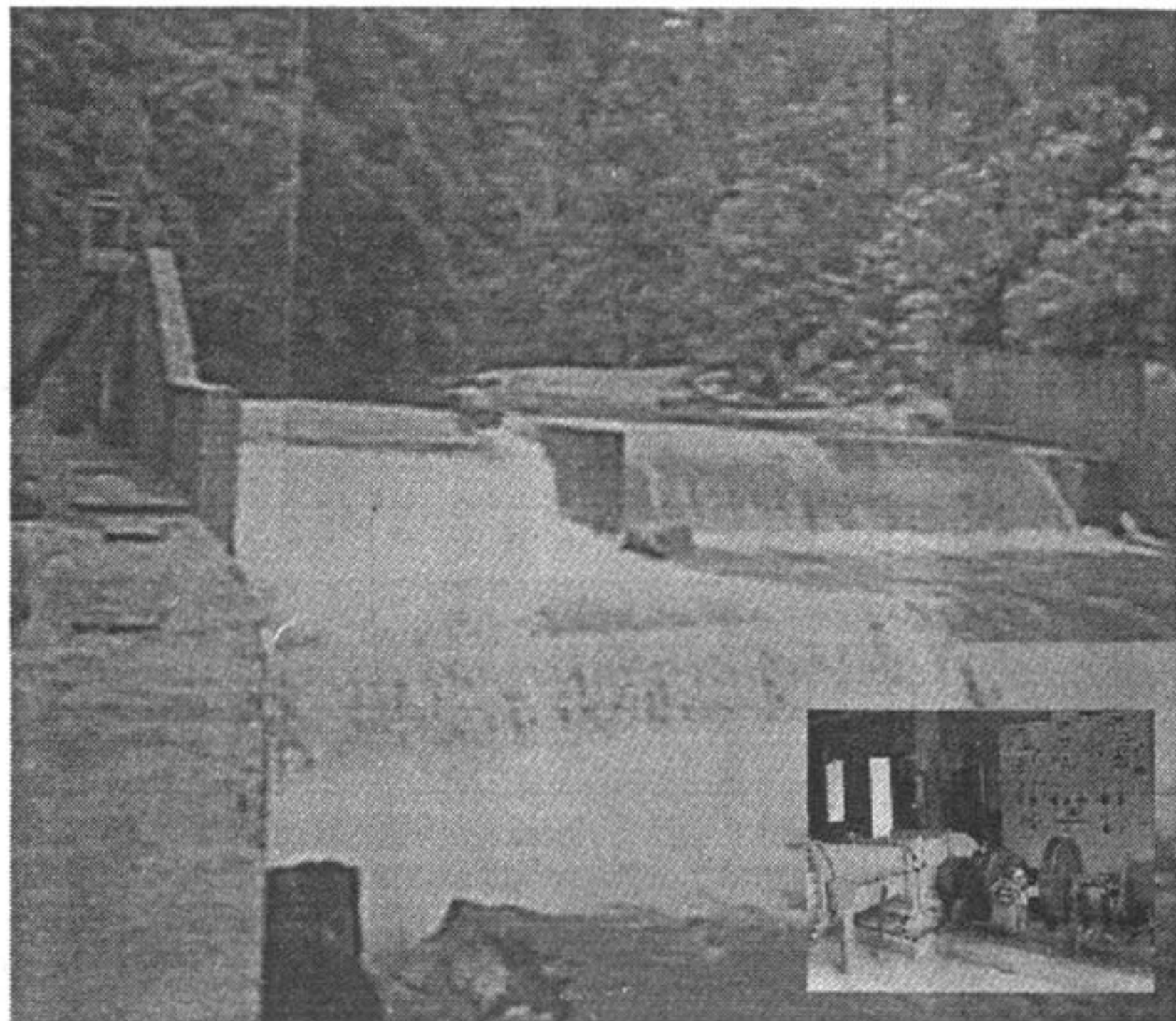


# Metodología y algoritmos para la selección óptima del caudal en una pequeña central hidroeléctrica



estos caudales; posteriormente se evalúan los ingresos y costos de la P.C.H., se compara con las anualidades, lo cual arroja unas utilidades, se evalúa el máximo y se obtiene el valor de caudal óptimo de diseño de esa pequeña central.

## ABSTRACT

*This paper shows a methodology and the required algorithms that has been developed for obtaining the design's **OPTIMUM FLOW** of a Small Hydro Plants (SHP). Then, historic and statistic data are evaluated as well as the economic feasibility, which will facilitate the information analysis and the decisions.*

## KEYWORDS

Optimum flow, small hydro Plants(SHP)

## RESUMEN

□ **Jairo A. Palacios Peñaranda, Ph.D.**  
Ingeniero Electricista  
Profesor Titular  
Universidad del Valle.

□ **Carmen Guerrero, M.Sc.**  
Ingeniera Electricista

Grupo de investigación de pequeñas Eléctricas

En este artículo se presenta una metodología y se desarrollan los algoritmos necesarios para obtener el caudal óptimo de diseño de una Pequeña Central Hidroeléctrica.

De la historia de caudales se obtienen estadísticamente unas curvas de caudales futuros, se evalúa la garantía y las aportaciones de

## 1. INTRODUCCIÓN

De la experiencia de la Universidad del Valle y entidades dedicadas al diseño y construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas (P.C.H.), se ha encontrado que el estudio de prefactibilidad es muy dispendioso y exige cálculos agobiantes.

El estudio que se presenta tiene como objetivo obtener unas cifras iniciales para sustentar la factibilidad de un proyecto. De acuerdo con esto, se propondrá y es-

tablecerá una metodología y sus algoritmos lo cual facilitará el análisis de la información y la toma de decisiones.

Los algoritmos se adecuan a centrales de base, que generan una potencia constante; centrales aisladas, las cuales siguen en generación a la demanda y/o centrales interconectadas al sistema eléctrico nacional.

Los tiempos de amortización de los créditos y la vida media del proyecto se manejan como variables para verificar la rentabilidad de la P.C.H. a diseñar. El resultado de los algoritmos presenta el caudal óptimo de diseño como variable final. Este resultado se genera de realizar la diferencia entre ingresos y egresos, los cuales se comparan con el precio del Kwh. en bolsa del mercado energético nacional.

## 2. HISTORIA DE CAUDALES

Partiendo de la historia de caudales (figura 1), los cuales siguen el régimen hidrológico, construimos la curva de probabilidad de caudales (figura 2), estas curvas representan el tiempo en meses en el cual se puede garantizar un nivel de caudal mínimo por año. En la figura 3, se presenta la zona que comprende el tiempo en meses durante el cual se puede garantizar el nivel de caudal mínimo "DURANTE LOS AÑOS FUTUROS". Cualquier dato de caudal debe encontrarse en la zona mencionada de probabilidades.

## 3. REGRESIÓN CURVILÍNEA

Con este método comprobamos que si al graficar  $\log y_i$ , versus  $x$  de las  $n$  parejas de puntos  $(x_i, y_i)$  y la figura resultante se endereza, esto indica que la curva de regresión de  $Y$  sobre  $x$  es una exponencial, con lo que podemos expresar su ecuación así:

$$\log y = \log \alpha + x * \log \beta$$

Con esta ecuación obtenemos la gráfica exponencial o logarítmica necesaria para nuestro proceso.

Las ecuaciones auxiliares para realizar este proceso son las siguientes:

$$\sum_{i=1}^n y_i = a * n + b \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\sum_{i=1}^n x_i * y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2$$

$a$  y  $b$  se asocian a  $\log a$  y  $\log b$  respectivamente. Para obtener la forma logarítmica final, empleamos la siguiente ecuación:

$$\text{Log } y = a + b * x$$

## 4. CURVA DE APORTACIONES

El área bajo la curva se calcula como la integral entre  $t_1$  y  $t_2$  para cada curva de probabilidades.

$$A_u = \int_{t_1}^{t_2} Q dt$$

En la figura 4, se presenta este resultado.

## 5. LA GARANTÍA DE PRODUCCIÓN (H)

Es la relación entre la energía producible y la que se obtendría con potencia máxima continua.

$$\eta = \frac{A_u (Km^3)}{0,032 * Q_d (Km^3)}$$

## 6. INFLUENCIA DEL CAUDAL

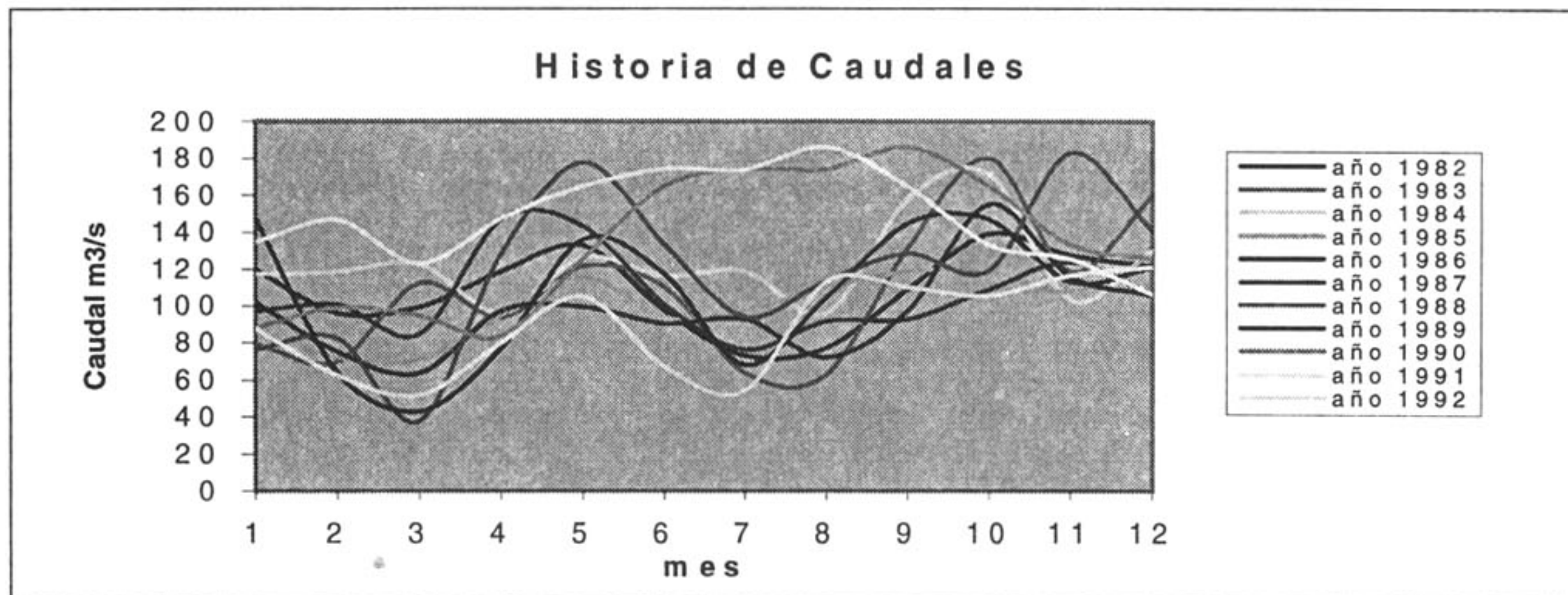


Figura 1. Historia de Caudales.

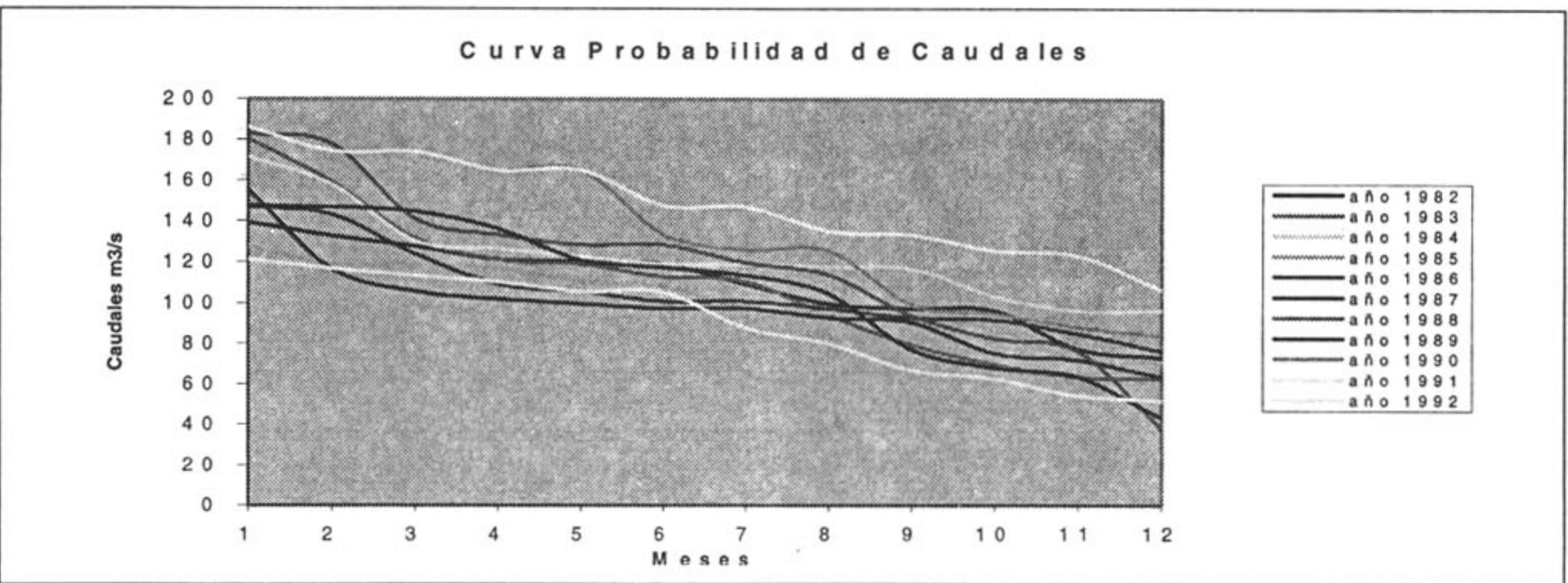


Figura 2. Curva de Probabilidad de Caudales.

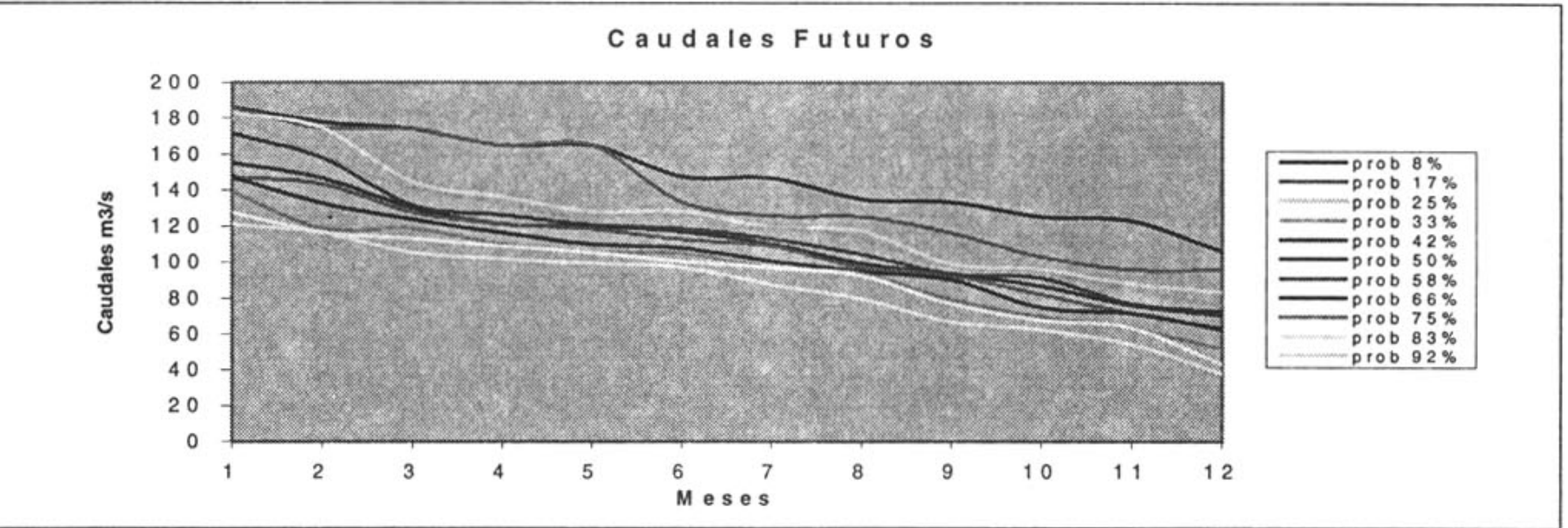


Figura 3. Curva de Caudales Futuros.

Definido  $\eta = 0,8$  con una probabilidad alta (para este caso del 92%), se toma ese caudal como PERMANENTE ( $Q_p$ ), igualmente se define la aportación permanente  $A_u$ . De la tabla 1 se toma  $Q_p = 90 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $A_u = 2.2 \text{ Km}^3$ .

*Caudal complementario*, partimos del supuesto para  $Q_c = 2 Q_p \text{ m}^3/\text{s}$ ; posteriormente calculamos la aportación esperada para  $Q = 2 Q_p \text{ m}^3/\text{s}$ .

La aportación esperada se calcula para cada valor de caudal  $Q$  (la tabla 2 presenta una iteración para  $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

## 7. CÁLCULO DEL CAUDAL ÓPTIMO

Se espera que se encuentre entre  $Q_p$  y  $2 Q_p \text{ m}^3/\text{s}$ . Se utilizan intervalos de 10 en 10 para este proceso y se calcula la aportación esperada para cada caso.

En la tabla 3 se presentan los resultados, observamos el  $Q$  para el cual exista mayor variación de  $n$  y  $h$ , ese será el valor del caudal óptimo.

## 8. CURVA INGRESOS - CAUDALES

Definido el caudal óptimo, se calcula la Potencia y Energía, manteniendo un salto constante.

$$P = Q_d * H_n * 9.8 * \phi_h * \phi_a * \phi_t$$

$$E_e = 9,8 / 3.600 * A_e * H_n * \phi_h * \phi_a * \phi_t.$$

Utilizando los valores que dan las casas constructoras para los valores de  $\phi_h$ ,  $\phi_a$  y  $\phi_t$  se tiene:

$$P = 8.467 Q_d * H_n \text{ (Kw)}$$

$$E_e = 0,00235 * A_e * H_v$$

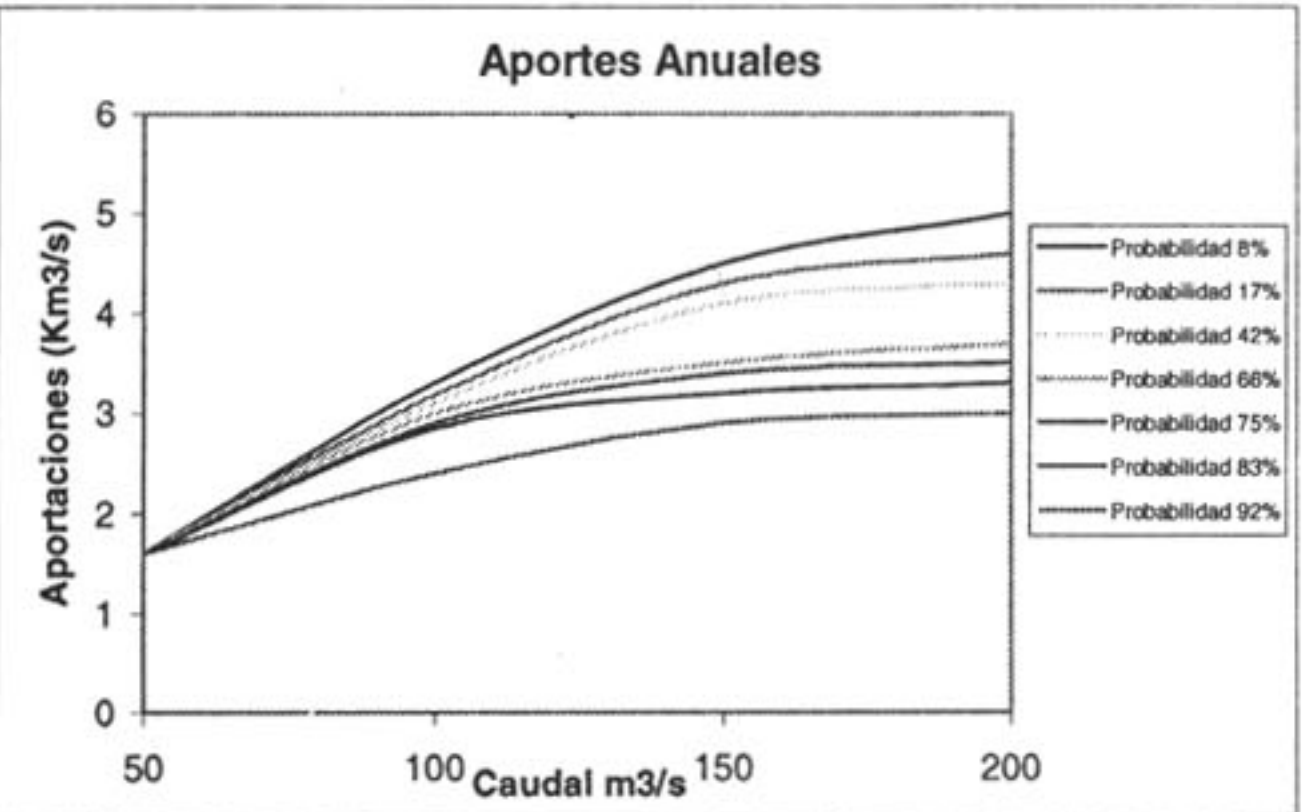


Figura 4. Curva de aportaciones anuales.

| Caudal | Au  | ?   | Au  | ?   | Au  | ?   | Au  | ?   | Au  | ?   | Au  | ?   | Au  | ?   |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Q      | 8%  | 8%  | 17% | 17% | 42% | 42% | 66% | 66% | 75% | 75% | 83% | 83% | 92% | 92% |
| m³/s   | Km3 |     | Km3 |     | Km3 |     | Km3 |     | Km3 |     | Km3 |     | Km3 |     |
| 50     | 1.6 | 1.0 | 1.6 | 1.0 | 1.6 | 1.0 | 1.6 | 1.0 | 1.6 | 1.0 | 1.6 | 1.0 | 1.6 | 1.0 |
| 70     | 2.3 | 1.0 | 2.3 | 1.0 | 2.2 | 1.0 | 2.2 | 1.0 | 2.2 | 1.0 | 2.2 | 1.0 | 1.9 | 0.9 |
| 90     | 3.0 | 1.0 | 2.9 | 1.0 | 2.8 | 1.0 | 2.8 | 1.0 | 2.7 | 1.0 | 2.7 | 1.0 | 2.2 | 0.8 |
| 100    | 3.3 | 1.0 | 3.2 | 1.0 | 3.1 | 1.0 | 3   | 1.0 | 3   | 1.0 | 2.9 | 0.9 | 2.5 | 0.8 |
| 110    | 3.6 | 1.0 | 3.5 | 1.0 | 3.4 | 1.0 | 3.2 | 0.9 | 3.1 | 0.9 | 3   | 0.9 | 2.6 | 0.7 |
| 120    | 3.9 | 1.0 | 3.8 | 1.0 | 3.7 | 1.0 | 3.2 | 0.8 | 3.1 | 0.8 | 3   | 0.8 | 2.8 | 0.7 |
| 130    | 4.1 | 1.0 | 3.9 | 1.0 | 3.7 | 0.9 | 3.4 | 0.8 | 3.4 | 0.8 | 3.2 | 0.8 | 2.9 | 0.7 |
| 140    | 4.2 | 1.0 | 4   | 0.9 | 3.9 | 0.9 | 3.5 | 0.8 | 3.4 | 0.8 | 3.2 | 0.7 | 2.9 | 0.7 |
| 150    | 4.5 | 1.0 | 4.3 | 0.9 | 4.1 | 0.9 | 3.5 | 0.7 | 3.4 | 0.7 | 3.2 | 0.7 | 3   | 0.6 |
| 170    | 4.6 | 0.9 | 4.5 | 0.8 | 4.2 | 0.8 | 3.6 | 0.7 | 3.4 | 0.6 | 3.2 | 0.6 | 3   | 0.6 |

Tabla 1. presenta el cálculo para varios  $\eta$ .

| P%                                 | A <sub>u</sub><br>(Km³) | Semisuma<br>con<br>anterior | Intervalo<br>$\Delta P$ | Semisuma x<br>$\Delta P \times 0,01$ |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 92                                 | 2,95                    | 2,95                        | 4                       | 0,118                                |
| 83                                 | 3,20                    | 3,075                       | 9                       | 0,277                                |
| 75                                 | 3,40                    | 3,30                        | 8                       | 0,264                                |
| 66                                 | 3,50                    | 3,45                        | 9                       | 0,311                                |
| 42                                 | 4,06                    | 3,78                        | 24                      | 0,907                                |
| 17                                 | 4,30                    | 4,18                        | 25                      | 1,045                                |
| 8                                  | 4,50                    | 4,4                         | 9                       | 0,396                                |
| 0                                  | 4,50                    | 4,5                         | 8                       | 0,360                                |
| Aportación esperada A <sub>e</sub> |                         |                             |                         | 3,679                                |

Tabla 2. Iteración para  $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$

| Qd  | Ae    | Ap  | Ac    | n     | h    |
|-----|-------|-----|-------|-------|------|
| 90  | 2.655 | 2.2 | 0.455 | 0.922 | 8076 |
| 100 | 2.900 | 2.2 | 0.700 | 0.906 | 7939 |
| 110 | 3.116 | 2.2 | 0.916 | 0.885 | 7755 |
| 120 | 3.250 | 2.2 | 1.050 | 0.846 | 7414 |
| 130 | 3.430 | 2.2 | 1.230 | 0.825 | 7223 |
| 140 | 3.523 | 2.2 | 1.323 | 0.786 | 6889 |
| 150 | 3.679 | 2.2 | 1.479 | 0.766 | 6714 |

Tabla 3

Estos valores se tienen en cuenta en el momento de evaluar el proyecto según los valores del mercado energético nacional. En la tabla 4 se presenta un ejemplo de la variación de ingresos según el caudal.

| Q <sub>d</sub> | P<br>(kw) | E <sub>e</sub><br>(Gwh) | Ingreso anuales*<br>Esperados (Mpesos) |                    |
|----------------|-----------|-------------------------|----------------------------------------|--------------------|
|                |           |                         | Por E <sub>p</sub>                     | Por E <sub>c</sub> |
| 25             | 56.411    | 423.205                 | 13,809.355                             | 716.300            |
| 30             | 67.694    | 464.539                 | 13,809.355                             | 1,749.650          |
| 35             | 78.111    | 497.419                 | 13809.355                              | 2,571.650          |
| 40             | 89.269    | 523.566                 | 13,809.355                             | 3,225.325          |
| 45             | 100.428   | 545.172                 | 13,809.355                             | 3,765.475          |
| 50             | 111.587   | 563.334                 | 13809.355                              | 4,219.525          |

Tabla 4.

\*Las columnas de ingresos anuales esperados se realizan con datos en pesos del año 2000, del mercado energético nacional colombiano, (a \$120.00 pesos Kw/h, precio del consumidor)

### 9. CURVA COSTOS CAUDALES

Para cada caudal de equipo tenemos que obtener el presupuesto total del salto. Para ello se deben conocer las dimensiones de las distintas obras y sus precios. Para la evaluación de costos, se tienen las ecuaciones presentadas en la tabla 5. Según las variables de dependencia como: **Q**, **hb**, **P**, etc., se proyectan los costos para cada una de las partes de la Pequeña Central Hidroeléctrica.

| PARTES DE UNA P.C.H. CON SUS VARIABLES DE DEPENDENCIA. |                                |                                                           |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Presa Derivadora y Caminos                             |                                | $CDB = (7.1 * hb^2 + 76.1 * hb + 26.6) * kv * Lb$         |
| Bocatoma                                               |                                | $CTD = 151 * Q^2 + 1.073 * Q + 2101,3$                    |
| Tubería de Presión                                     |                                | $CTB = (104 * Q^2 + 167121,2 Q + 36846) * LTB$            |
| Turbina                                                |                                | $CTu = -3,1 * 10^{-3} (P / ng)^2 + 131,2 (P / ng) + 6267$ |
| Generador                                              |                                | $CGE = 4 * 10^{-3} (P / ng)^2 + 6.1 (P / ng) + 13331$     |
| Panel de Control                                       |                                | $COC = 4 * 10^{-3} P^2 + 40 P + 8262,9$                   |
| Casa de Máquinas                                       |                                | $CCM = 10^{-3} P^2 + 3,6 P + 49705$                       |
| Subestación                                            |                                | $CSE = 0,02 P + 28,6 P + 14643,7$                         |
| Línea de transmisión                                   |                                | $CLT = (3,1 P + 3968) Llt$                                |
| Desviación del Río                                     |                                | $CDR = (9,3 * hb^2 - 9,4 * hb + 68,8) * Lb$               |
| Instalaciones Temporales                               |                                | $CAC = 2,6 P + 12247,3$                                   |
| Administración                                         |                                | $CAP = 0,4 * P * sm.$                                     |
| Ingeniería                                             |                                | $CEP = 0,7 * P * sm.$                                     |
| hb                                                     | Ancho de la presa              | m                                                         |
| Lb                                                     | Longitud de la presa           | m                                                         |
| LTB                                                    | Longitud de tubería presión    | km                                                        |
| Llt                                                    | Longitud de la línea de trans. | km                                                        |
| P                                                      | Capacidad                      | kw                                                        |
| ng                                                     | Número de generadores          |                                                           |
| sm.                                                    | Salario mínimo                 | us\$                                                      |
| kv                                                     | Coeficientes de valle          | Desde 1,0 a 1,5                                           |
| kt                                                     | Coeficientes topográfico       | Desde 0,6 a 2,85                                          |

Tabla 5. Documento del Brasil – STATE-OF-ART OF THE SMALL HYDRO IN BRAZIL.  
Los costos resultantes se dan en dólares.

En la tabla 6 se presenta un ejemplo donde el caudal varía de 25 a 50 m³/s y en esa misma proporción se verifica la variación de costos y anualidad.

$C = C_o (\beta \times \text{imprevistos})$

10. UTILIDADES

Cruzando la información de Costos – Ingresos, tenemos finalmente las utilidades, las cuales arrojan un valor máximo para un determinado caudal, a ese valor de caudal lo denominamos **caudal óptimo** de diseño para

la Pequeña Central Hidroeléctrica (ver Tabla 5). En la figura 5, observamos ese máximo. En la figura 6, se presenta la anualidad de amortización y el beneficio neto como ejemplo para ilustrar este caso.

11. MANEJO AMBIENTAL

El proceso se puede ajustar de acuerdo a la normatividad ambiental existente, si se deja un porcentaje para actividades piscícolas o de recreación. El proceso debe regresar al caudal óptimo y realizar los ajustes necesarios.

| Qd | Co<br>Mpesos. | C<br>Coste<br>Total<br>Mpesos. | Anualidad de<br>Amortización<br>(12% en 30<br>años)<br>Mpesos. |
|----|---------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 25 | 40'812.123    | 62'055.650                     | 7'250.000                                                      |
| 30 | 43'232.933    | 65'736.540                     | 7'680.000                                                      |
| 35 | 46'103.870    | 70'101.857                     | 8'190.000                                                      |
| 40 | 49'537.736    | 75'323.119                     | 8'800.000                                                      |
| 45 | 54'133.700    | 82'311.375                     | 9'616.438                                                      |
| 50 | 59'002.370    | 89'714.285                     | 10'481.319                                                     |

Tabla 6.

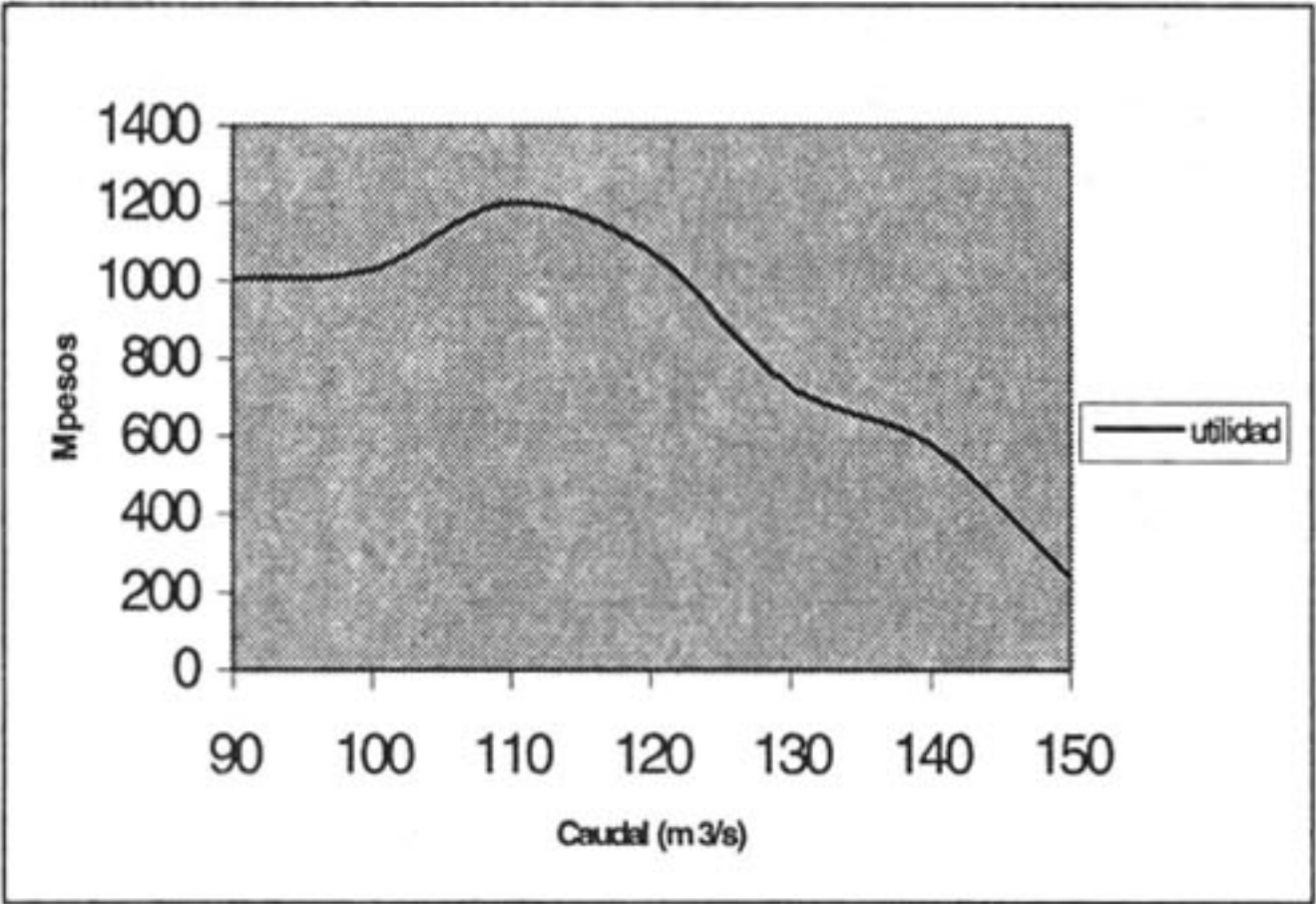


Figura 5. Utilidades.

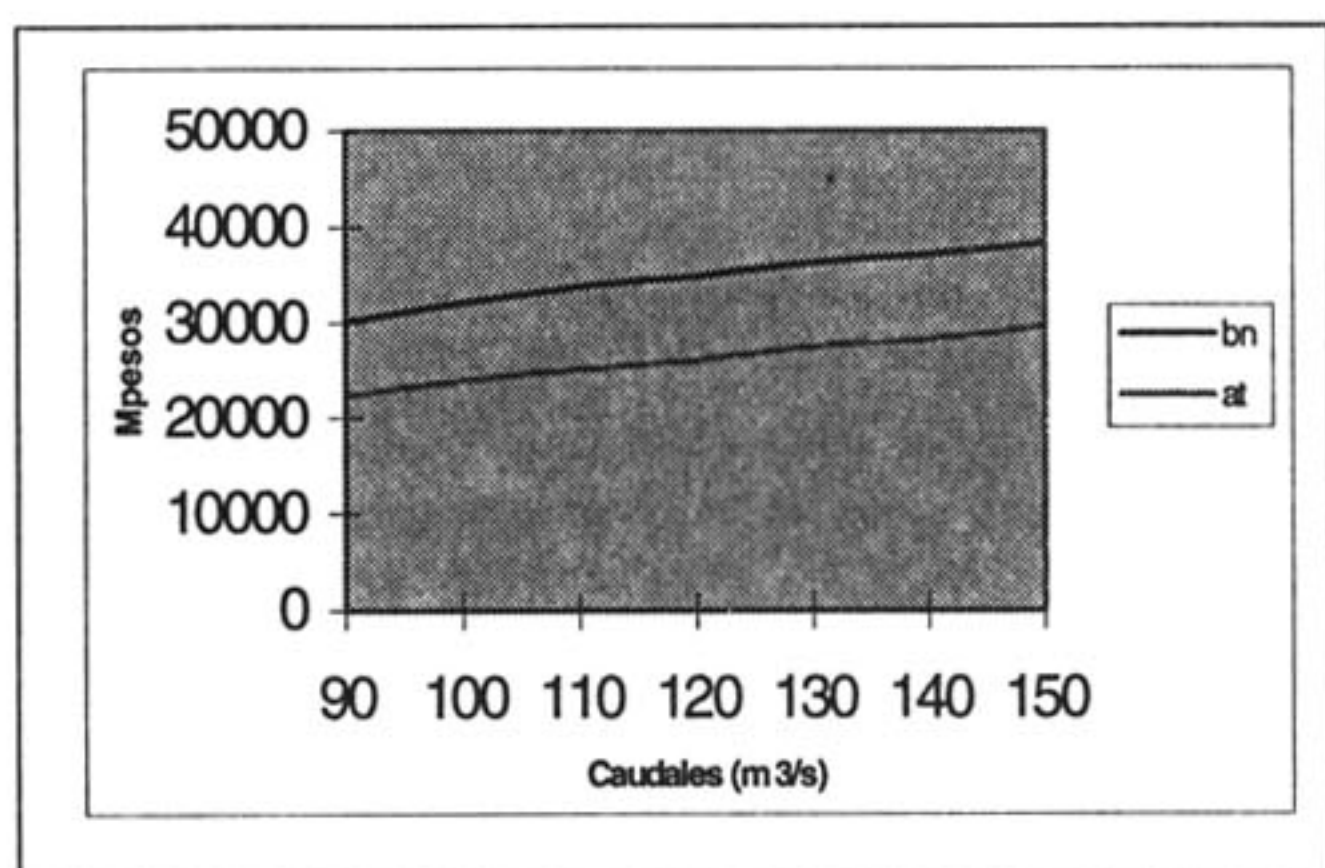
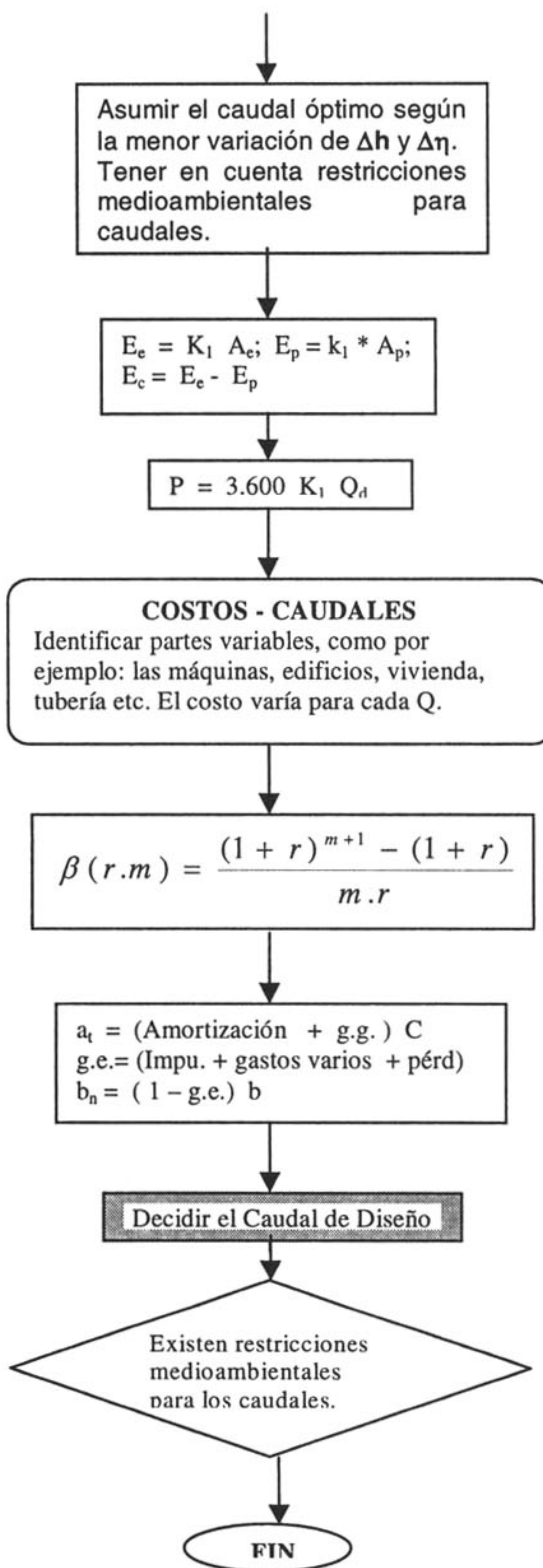
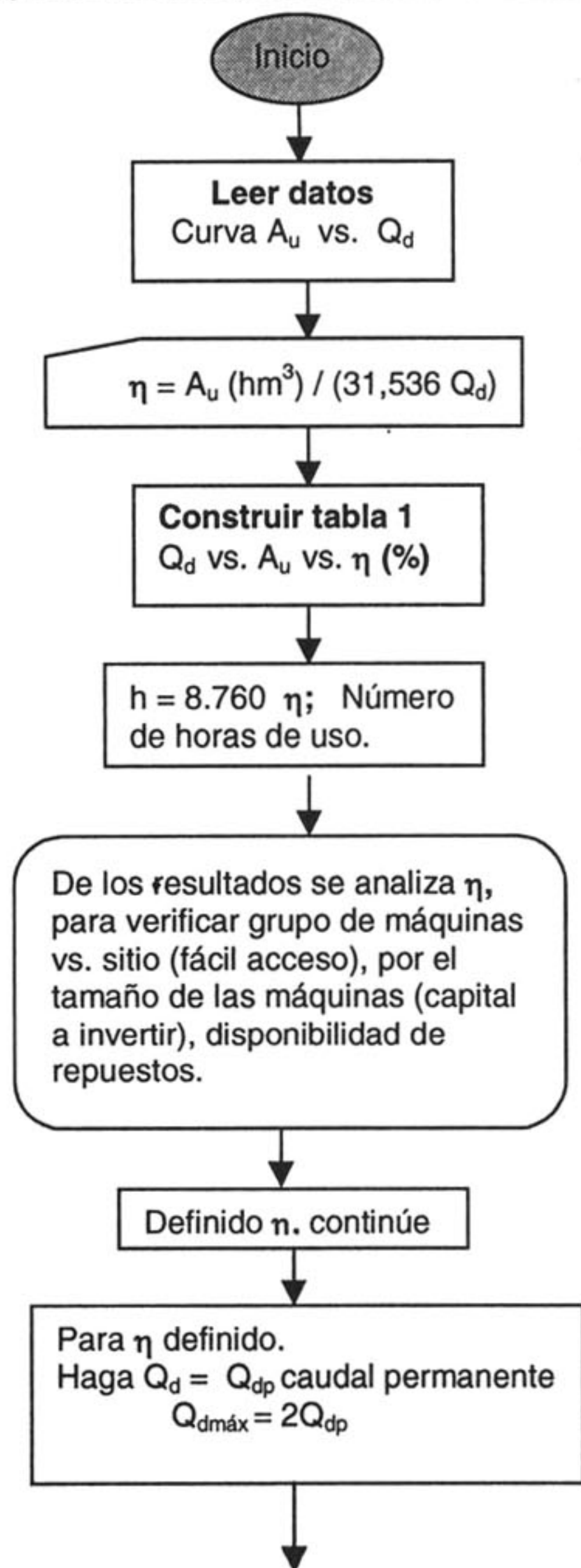


Figura 6. Beneficio y Anualidad de Amortización.



## 12. ALGORITMOS DESARROLLADOS

Se presentan los algoritmos más importantes del proceso, los cuales como prueba de escritorio se desarrollaron en excel.

### 13. CONCLUSIONES

1. Se definieron los algoritmos de factibilidad económica en el diseño de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.
2. El algoritmo propuesto para los costos es aplicable cuando se dispone de la información de obras construidas previamente.
3. Esta metodología posibilitará rapidez en la evaluación y preparación de proyectos hidroeléctricos a empresas financiadoras.
4. El algoritmo permite hacer la comparación de costos del Kw. instalado, con respecto a las utilidades logradas para cada alternativa de caudal (el caudal óptimo seleccionado, será el que permita el máximo valor de utilidades cuando se cruza la información de los ingresos y egresos).
5. Esta metodología permite evaluar las futuras plantas con el mismo régimen de precios de bolsa del mercado energético.
6. El algoritmo posibilita incluir consideraciones de normas medioambientales sobre caudales mínimos.
7. Las referencias internacionales valoran el Kwh en US\$1.000.00. Para el caso de Colombia como país en vía de desarrollo, este valor se incrementa fuertemente y las justificaciones entre otras pueden ser:
  - Pagos de aranceles por las importaciones de elementos de la P.C.H. como: turbinas, transformadores, generadores etc.
  - Los terrenos de nuestra geografía son muy accidentados, en muchos casos requieren sobredimensionamiento en las estructuras.

### 14. DESARROLLO FUTURO

- Desarrollar el software parcial y/o total para facilitar la toma de decisiones en el diseño de P.C.H.
- Tener en cuenta la sensibilidad de las variables en los resultados obtenidos, por ejemplo: el comportamiento de las utilidades en época de verano (variable caudal), los beneficios respecto a la inflación, en el caso de prestamos internacionales, como se incrementa el crédito con la valoración del dólar.
- Tener un sistema de información de diferentes P.C.H., que se hayan construido, estén en proceso de construcción o en estudios de factibilidad.
- Elaborar ecuaciones de costos que se adapten mejor a las condiciones del país, para valorar y adaptarlas en los procesos sistematizados (ver ecuaciones brasileñas – 1985).
- Desarrollar sistemas expertos, para variables que presentan muchas alternativas en el proceso (caso de la Garantía de producción h).
- Afinar el programa de computador para el análisis

económico en los aspectos de precio, costos y amortizaciones en pesos constantes, variables, dólares etc.

### 15. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] BARCHILLON, Moisés y MILLAN Leopoldo – La eficiencia de la energía hidráulica y su optimización. Centro de Investigaciones Hidráulicas – IMPSA – Argentina.
- [2.] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHES ZUSAMMENARBEIT (GTZ) GMBH, ESCHBORN. Manual para “La planificación y el dimensionamiento de obras hidráulicas de una minicentral hidroeléctrica”. Wolfenbuttel – Febrero de 1985.
- [3.] HIDROENERGÍA 1991. Actas de conferencia. 2<sup>nd</sup>. Internacional Conference y Exhibición. Agencia Francaise pour la maîtrise de l'énergie.
- [4.] I. I. Ilyinykh. Hydroelectric Stations. Editorial MIR Moscú. 1982.
- [5.] MANUAL DE DISEÑO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS – Lineamientos generales, Volumen I. II Curso Latinoamericano de Diseño de P.C.H. – OLADE – BID – ICEL. Bucaramanga – Colombia, Octubre de 1985.
- [6.] Moreira, S. Afonso, De Souza Zulcy y Tiago Filho Geraldo. STATE – OF – THE – ART OF THE SMALL HYDRO IN BRAZIL.
- [7.] PEN, Plan Energético Nacional – Ministerio de Minas y Energía. UPME – Unidad de planeación Minero – Energética – Edición, Mayo de 1994.
- [8.] POTES. E. Santos. Centrales Eléctricas – Universidad del Valle – 1967.
- [9.] Silva Carreño y Asociados Ltda. Prefactibilidad de Pequeña Central Hidroeléctrica de Guapi. Marzo de 1994. 

### AUTORES

**Jairo Arcesio Palacios.**  
Ingeniero Electricista, Universidad del Valle. Ph.D, Universidad Politécnica de Madrid. Profesor Titular en la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Su trabajo se centra en el área de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.



**Carmen Guerrero**  
Ingeniera Electricista y Magíster en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle.