

**Evaluación del potencial  
de  
aplicaciones minihidráulicas**

**CESEN**

## EVALUACION DEL POTENCIAL DE APLICACIONES MINIHIDRAULICAS CESEN

Los factores que determinan la potencia de una corriente son:

El caudal, es decir el volumen del agua que pasa a través de una sección cualquiera de la corriente en la unidad de tiempo, la caída del agua, el peso específico, es decir, el peso de un metro cúbico de agua, 1.000 kg/m<sup>3</sup>. Por consiguiente, la potencia de una corriente es el producto del caudal por la caída.

La máquina hidráulica, o turbina, se puede considerar como un transformador de energía, que permite convertir en energía “ordenada” (factible de ulteriores transformaciones útiles al hombre) lo que por el contrario, iría disperso en energía desordenada y turbulenta.

Existen considerables diferencias de construcción entre máquinas fabricadas para trabajar bajo una pequeña caída con gran caudal o bien bajo un alta caída con pequeño caudal, también con igual potencia. Resultan, por lo tanto, muy importantes los valores de caudal y de caída H.

En una cuenca hidrográfica, el caudal puede considerarse como la suma de una contribución de escorrentía superficial contemporánea a un evento de lluvia y de una contribución subterránea, es decir, de una restitución en tiempo diferido de una precipitación meteorológica precedente.

Para establecer en forma más clara lo descrito anteriormente, se debe estudiar lo siguiente:

- Superficie, forma y estado de la cuenca.
- Características del terreno superficial y profundo y de la vegetación.
- Características de pluviosidad y meteorológicas.
- Características de caudal de los ríos, para calibrar las extrapolaciones.

La caída H depende de la orografía y de la geología.

Caídas altas se encuentran en zonas montañosas de reciente formación geológica o bien en el afloramiento de estratos de origen y consistencia diferentes respecto a los circundantes.

Para conocer H se necesitan, por lo tanto, mapas topográficos muy exactos de la zona, a escalas distintas, es decir: a 1:50.000 para el reconocimiento y a 1:5.000 para el estudio de factibilidad.

### **Las plantas de pequeño tamaño y la metodología de CESEN**

Por lo general, las plantas de pequeño tamaño tienen, como es sabido, una función prevaeciente en el desarrollo industrial y económico de un país, suministrando energía con reducidas inversiones y breves tiempos de construcción, exactamente en la fase de desarrollo económico, cuando se necesitan limitadas cantidades de energía pero en tiempos muy breves y a bajos costos iniciales.

Las plantas de gran tamaño, con potencias unitarias de 1.000 MW se realizan luego, cuando el país, gracias a sus disponibilidades económicas logradas durante las etapas iniciales de su producción industrial, alcanza superiores recursos económicos para nuevas inversiones en plantas de mayores dimensiones.

Estas plantas, debido a su gran capacidad de producción, tienen costos iniciales muy elevados, necesitan muchos años para su construcción, de manera que no es cercano el momento en que se pueda explotar su producción energética.

Algunos países menos ricos que Colombia en recursos hidrológicos y con características orográficas no muy ventajosas, hicieron frente a sus necesidades de energía mediante pequeñas plantas térmicas, diesel o de turbinas de gases, con gastos de instalación mucho más limitados respecto a las plantas hidráulicas de pequeño tamaño, pero que tienen costos de funcionamiento mucho más altos.

La solución térmica, cuyas desventajas son, como es sabido, notorias es inevitable donde no hay alternativa hidráulica ni fuentes de energía renovable.

Esto es válido tan sólo en sentido general. En efecto, cuando se establezca la posibilidad de instalar una planta hidráulica de pequeño tamaño, se deberán evaluar sus costos iniciales y de funcionamiento, para ser comparados con los de una inversión alternativa, muy frecuentemente térmica.

Al mismo tiempo, se necesitará comparar los costos de una planta hidroeléctrica de gran tamaño (de unos 1.000 MW) con apropiadas alternativas térmicas de carbón o nucleares. Colombia es favorecida desde el punto de vista hidroeléctrico, gracias a su alta pluviosidad y a sus regiones montañosas; las centrales hidroeléctricas de 1.000 o 1.500 MW son por lo tanto bastante frecuentes y la potencia total instalable con tamaños mínimos de 100 MW alcanza unos 93.000 MW.

La potencia y la capacidad de producción de los tamaños inferiores a 100 MW, aún no han sido totalmente evaluadas, sobre todo debido a la falta de bases cartográficas a escala apropiada para el estudio de pequeñas centrales desde 100 KW hasta unos MW.

Merece tenerse en cuenta que toda la superficie de Colombia (1,142 x 10 km<sup>2</sup>) puede representarse en poco más o menos 120.000 tablas a escala 1:5000, en 30.000 tablas a escala 1:10.000 y en 4.800 tablas a escala 1:25.000 de tamaño estándar.

El reconocimiento de saturación de todos los recursos hidroeléctricos a partir del mínimo tamaño de 100KW, necesitaría una cantidad desmesurada de trabajo y de capital para establecer los siguientes aspectos:

- Reconocimiento aerofotogramétrico a escala apropiada.
- Fotorestitución de los mapas a la escala más apropiada. (1:10.000 aproximadamente)
- Inspección directa de las 30.000 tablas a escala 1:10.000 para establecer la existencia de caídas de más de 10 m de altura (límite de legibilidad de las mismas tablas) ( $= 7.5 \times 10 / m \ 1.5 m^3 / s = 100 KW$ )
- Evaluaciones hidrológicas a fin de definir caudales permanentes de por lo menos 0,15 M<sup>3</sup>/seg

(p.  $7.5 \times 100 m \times 0.15 m^3 / s = 100 KW$ )

A la expectativa de nuevas técnicas de computadoras que puedan contribuir en la ejecución de un programa de tal magnitud, en particular respecto a la investigación cartográfica, hemos decidido efectuar otro tipo de estudio para identificar centrales hidráulicas de pequeño tamaño considerando, entre otras cosas, que los tamaños más frecuentes se encuentran entre los 100 y 1000 KW en centros habitados de 1.000 a 10.000 habitantes.

Con base principalmente en los datos hidrológicos existentes, se trazan las curvas de duración normal aplicables a los ríos de una región hidrológicamente homogénea.

Al mismo tiempo, se identifican los polos de desarrollo de la zona bajo estudio. Luego de la intersección de zonas ya provistas de cobertura fotogramétrica o cartográfica con las zonas comprendidas entre los polos de desarrollo y con una relación de sitios posibles, se determina una lista de sitios en donde es oportuno concentrar ulteriores investigaciones.

Se excluyen sitios que al mismo tiempo presenten:

- Falta de cobertura fotogramétrica.
- Distancia excesiva desde los polos de desarrollo.

Para los sitios provistos de fotocobertura, pero que están muy lejos de los polos de desarrollo, se efectúa una evaluación de la potencia instalable.

Si tal potencia es compatible con la distancia, el sitio se encuentra en el grupo que merece ulteriores estudios; en caso contrario, se excluye.

Para los lugares que se encuentran cerca de los polos pero carecen de fotocobertura, se evalúa la posibilidad de efectuar reconocimiento aerofotogramétricos según la potencia instalable.

Si tal potencia es compatible con el costo de un reconocimiento aerofotográfico y de fotorestitución, se escoge el sitio para ulteriores estudios; en el caso contrario se le elimina.

Luego, se analizan los sitios escogidos en detalle, con evaluación de los gastos de instalación de cada planta.

Estos costos se deducen de un análisis de los mapas y de las fotografías de cada sitio, suponiendo una posible solución de instalación. El estimativo de los costos permite evaluar simples cantidades, como por ejemplo, los costos/KWH o los costos/KW instalado, lo que permite establecer un escalamiento de los sitios según costos unitarios crecientes.

Se escogen sólo los sitios con perspectivas importantes, mientras que se rechazan los que presentan costos que superan los de una alternativa térmica.

Se visitan luego los sitios restantes, a fin de evaluar más exacta y detalladamente los gastos de instalación mediante inspección topográfica, geológica e hidrológica.

Finalmente, con base en las indicaciones que se obtienen de las visitas, se elaboran factibilidades técnico/económicas para los sitios seleccionados, que nos permiten identificar un esquema de planta posible, con definición exacta de las evaluaciones económicas.

### **Estudios de factibilidad**

Las indagaciones hidrológicas se efectúan a fin de determinar la curva de duración de un río y de su caudal de creciente en función de un cierto período de retorno.

El conocimiento de la caída disponible, considerada como diferencia entre los niveles de la toma de agua y de restitución, establecido mediante un cuidadoso análisis del material fotocartográfico, completa la información mínima necesaria para dimensionar la planta hidroeléctrica en su conjunto.

La determinación del caudal del proyecto es la primera tarea del proyectista. Con antelación a la selección de la planta es antes que todo importante establecer el tipo de servicio que tal planta tendrá que ejecutar.

Los tres tipos fundamentales de plantas hidroeléctricas son:

- 1) Sin embalse, es decir, de filo de agua sin posibilidad, por lo tanto, de regular los flujos de salida.
- 2) Con limitado embalse de almacenamiento, para una regulación diaria o semanal.
- 3) Con embalse de almacenamiento, para una regulación estacional.

La existencia del embalse permite manejar el caudal total de alimentación a las turbinas, acumulando agua durante los inviernos y accionando la turbina según las exigencias del servicio.

En los países desarrollados las plantas trabajan interconectadas. Se presenta, por lo tanto, el problema de coordinar el funcionamiento de cada planta para una más racional y completa explotación de sus características, lo que representa la ventaja fundamental de las interconexiones.

Sin considerar la existencia de las centrales termoeléctricas, cuyas características defieren considerablemente de las correspondientes a las centrales hidroeléctricas, se puede afirmar que las centrales de filo de agua absorben la base del diagrama de consumo, es decir que suministran la potencia mínima requerida por la red. Estas centrales funcionan, por lo tanto, con grado de abertura fijo o controlado por factores independientes a la carga de la red.

Las centrales con regulación subdiaria o diaria pueden funcionar con caudales variables, sin pérdida de energía, modificando la abertura del distribuidor.

A estas centrales se encomienda la absorción del cuerpo del diagrama de carga de la red, trabajando a potencias constantes en cada período del día.

Las centrales con gran embalse de almacenamiento son las más aptas para hacer frente a fuertes y rápidas variaciones de potencia. A estas centrales se deja el papel de seguir las variaciones de carga en la red (picos), por medio de un regulador automático que, al variar la carga, abra o cierre inmediatamente el distribuidor de máquina, conecta o desconecta uno o más grupos.

La abertura en el distribuidor de máquina, es controlado frecuentemente por la altura del agua en las obras de toma por medio de un flotador y de transmisiones mecánicas o hidráulicas, a fin de mantener la superficie libre en su máximo nivel, maximizando, de esta manera, la potencia obtenible a igual caudal.

La presencia de centrales de este tipo en una red interconectada, es de importancia fundamental en cuanto a que, manteniendo siempre equilibradas la potencia motriz y la potencia absorbida, regulan la frecuencia de la red y se definen, por lo tanto, como centrales piloto.

Muy distinto es el problema de una red aislada, donde una sola central tiene que hacer frente al servicio de base y de pico.

Es, en efecto, el caso más frecuente en los países en desarrollo y, en particular, en los programas de electrificación rural de áreas aisladas.

En este caso, se puede decir que las cargas, casi siempre de limitado tamaño, presentan por lo general las siguientes características:

- Prevalencia de carga de tipo doméstico o público (alumbrado, calefacción).
- Presencia de cargas limitadas de tipo artesanal (fuerza motriz).
- Curva de carga con picos netos y bien definidos.

El conocimiento de la curva de carga es muy importante; tal curva es trazada comúnmente por nosotros, según los datos de una investigación minuciosa respecto a los usos finales de la energía.

Normalmente se intenta cubrir toda la curva de carga mediante el empleo de recursos hidroeléctricos, cada vez que es posible, regulando por medio del distribuidor de máquina la potencia para alimentación de la red.

Cada tipo de turbina tiene su propio campo de variación del caudal del cual no puede alejarse. El de una turbina Francis varía, por ejemplo, entre 5/10 y 11/10 del caudal de máximo rendimiento.

Las indagaciones socioeconómicas tienen como fin el prever, para un período de servicio útil de la planta, el incremento de población y de los consumos, es decir, la variación prevista de la demanda de energía y potencia.

Las potencias pico proyectadas en treinta años superan muy raramente, según nuestra experiencia, unos millares de KW y más frecuentemente alcanza 100-500 KW.

A las potencias pico antes mencionadas, se asocia un caudal que se obtiene de la siguiente fórmula:

$$P \text{ [KW]} = 7.5 H \text{ [m]} Q \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Es decir:

$$Q = P / (7.5H)$$

\*) Suponiendo en primera aproximación H constante.

En este punto, se toma en cuenta la curva de duración de los caudales y la determinación, aunque aproximada, de la caída obtenida de un mapa o de una fotografía aérea.

El caudal Q puede encontrarse por debajo del mínimo anual o bien en un punto de la curva de duración misma.

En el primer caso no hay problema en cuanto a que el río está probablemente en condiciones de asegurar el caudal necesario durante todo el año.

Como es lo normal en estos casos, el caudal del proyecto se selecciona con exceso, a fin de tener en cuenta variaciones también sensibles de la caída H en los periodos de avenida o de medio caudal.

Cuando, al contrario, Q supera el caudal mínimo, el valor utilizable por la turbina ( $Q_{5/10}$  para la turbina Francis), se hace corresponder con el caudal mínimo del cauce, es decir.

$$Q_{5/10} = Q_{360}$$

Esto significa que durante un cierto número de días del año, la turbina hidráulica trabaja con caudal reducido y que, en el futuro, podría ser necesario conectar a la red unidades adicionales (por ej. Diesel) para hacer frente al pico de la curva de carga calculada según los consumos proyectados en 30 años.

Es de resaltar, además, que las plantas de pequeño tamaño siguen, por lo general, el modelo de filo de agua en cuanto a que las tipologías con embalses de compensación son raramente convenientes debido a la limitada potencia de que se trata.

El criterio de dimensionamiento es, por lo tanto, tan sólo función de la demanda de potencia prevista.

Para plantas más grandes (con potencias de unos millares de KW) consideramos conveniente determinar el caudal total nominal de alimentación según criterios distintos más sofisticados, calculando el caudal que minimiza el costo del KWH producido o bien el caudal que iguala un umbral prefijado del costo/KWH.



En todos los casos, el conocimiento de la curva de duración es un potente instrumento en las manos del proyectista aún cuando se trate de más de un grupo de turbo generadores.

El caudal total se subdivide, por lo general, en pocos grupos obteniendo, respecto a una solución de muchos grupos, lo siguiente:

- Ahorro en el costo inicial, desde la maquinaria electromecánica hasta los tableros.
- Mayor rendimiento de la maquinaria que aumenta al hacerlo la potencia unitaria.

La subdivisión del caudal del proyecto en una mayor cantidad de grupos asegura:

- Mayor flexibilidad en seguir la curva de carga, manteniendo cada máquina siempre cerca de su plena carga, y conectando o desconectando una o varias máquinas cada vez que sea necesario.
- Posibilidad de escalonar la instalación de las máquinas sin inmovilizar capitales que, al menos inicialmente, resultarían improductivos.

Las desventajas y ventajas indicadas, son evidentes en caso de que se trate de plantas de gran tamaño, mientras que tienden a disminuir en caso de plantas pequeñas en cuanto a que los factores positivos y negativo influyen sobre los varios tipos de planta de manera distinta.

Las plantas de pequeño tamaño, casi todas del filo de agua sin regulación del flujo de salida y proyectadas para funcionar a cargas constantes, adoptan la mínima cantidad de grupos, por lo general dos, cuando la potencia supera 1.000 KW y uno con potencias inferiores, salvo que no se prefiera subdividir la potencia total. También en este caso, en dos grupos iguales, a fin de asegurar una mayor continuidad del servicio en caso de avería de un grupo.

Esto es posible en cuanto a que las turbinas de pequeño tamaño están, por lo general, normalizadas y el incremento de costo, cuando se tengan dos máquinas y no una de doble tamaño, es casi siempre limitado.

Después de establecido el caudal del proyecto, se puede establecer el tamaño de la planta.

En efecto, del caudal y de la conformación topográfica dependen las dimensiones de las obras de toma, del canal de encaminamiento y del conducto forzado de las máquinas, de la central y del canal de restitución.

El conocimiento de  $Q$  y de  $H$ , permite determinar el tipo de turbina a emplear, estableciendo el número de vueltas específico de la máquina según la fórmula siguiente:

$$n_s = \frac{n (\eta g p)^{1/2}}{1000} \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

donde:

- ns** = número de vueltas efectivo de la turbina, escogido según las características del generador.
- n** = rendimiento máximo de la turbina.
- g** = constante de gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- p** = peso específico del agua (1000 kgf/m<sup>3</sup>).
- Q** = caudal de proyecto (m<sup>3</sup>/s).
- H** = caída (m).

Para cada tipo de turbina, el valor ns oscila entre determinados límites que, según la experiencia, es oportuno no superar a fin de evitar máquinas mal proporcionadas y de escaso rendimiento.

Los límites antes mencionados se indican en el cuadro siguiente, donde se da el valor de ns respecto a H expresada en metros y a Q en m<sup>3</sup>/s.

Tipo de turbina	ns
Pelton 1 chorro	4-20
Pelton de varios chorros (de 2 a 6)	20-70
Francis lentas	50-100
Francis normales	100-200
Francis veloces	200-300
Francis muy veloces	300-400
Elices	400-900

El valor de ns así calculado, sirve para determinar las principales características geométricas de la turbina mediante fórmulas especiales que se relacionan a continuación, como ejemplo:

#### Ruedas Pelton

$$D = \frac{400}{n_s} \left( \frac{Q}{C_v (2gH)^{1/2}} \right)^{1/2}$$

#### Ruedas Francis

$$\left( \frac{D_o}{b_o} \right)^{1/2} = \frac{370}{n_s \cos \alpha} \left( \frac{t_g \alpha}{C'_v} \right)^{1/2}$$

donde:

- $C_v$  = coeficiente de velocidad .
- $D$  = diámetro de la rueda.
- $n_s$  = número de vueltas específico.
- $b_o$  = altura exterior de la rueda.
- $D_o$  = diámetro de la rueda.
- $\alpha$  = ángulo entre las direcciones de la velocidad absoluta de entrada y la velocidad periférica de la rueda.
- $C'_v$  = coeficiente de velocidad.

Desde el punto de vista económico, son preferibles máquinas muy veloces y de gran potencia unitaria. Dado que el número de vueltas de la máquina es inversamente proporcional a la raíz de la potencia (con igual  $n_s$ ). Existe el peligro de que la ventaja de la concentración de potencia, sea anulada por la menor velocidad de los grupos. Al alcanzar la potencia un valor doble, se reduce en razón del 30%.

Los grupos modernos alcanzan, de todas maneras, velocidades suficientes, también con altas potencias unitarias (decenas o centenares de MW).

El conocimiento cuantitativo de las crecientes y de los relativos tiempos de retorno, permite dimensionar correctamente las obras de descarga sobre la travesía de barrera del río, así como ubicar la central en el sitio más adecuado a fin de eliminar los riesgos de inundaciones o aluviones. Para un correcto dimensionamiento de las plántas y una apropiada protección contra las avenidas, es, por lo tanto, muy importante conocer exactamente las condiciones hidrológicas del río.

Una apropiada información fotocartográfica es también indispensable.

Por lo general, en el transcurso de nuestro estudio, hemos establecido que los datos meteorológicos de base disponibles, son bastante satisfactorios y bien organizados, con series históricas atendibles como en el caso de Colombia.

La información fotocartográfica, al contrario, puede ser buena en países como Jamaica o las pequeñas islas de las cuales existen mapas a escala 1:10.000, mientras que es frecuentemente insuficiente en los grandes países de la América del Sur o de Africa, de los cuales existen únicamente mapas referentes al servicio hidrográfico.

Esto se explica muy simplemente debido al costo muy elevado de las operaciones de la fotogrametría en áreas aisladas y en condiciones atmosféricas (nubosidad muy densa y nubes bajas) demasiado adversas para un reconocimiento aerofotográfico apropiado.

Es imposible, por lo tanto, efectuar reconocimiento de saturación en todas las caídas de una cierta importancia, mientras que se puede lograr una regionalización hidráulica de amplias áreas de territorio.

De los dos valores antes citados, Q y H, falta por lo tanto el segundo, cada vez que se intente individualizar definitivamente todos los recursos hidroeléctricos para partir de un tamaño mínimo preestablecido.

Esto no disminuye la importancia de los estudios hidrológicos que pueden mostrarse muy útiles también para empleos del agua distintos al de la producción de energía (irrigación, planificación territorial, etc.) y que no necesitan, para su utilización práctica, la variable H relacionada a la caída.

El reconocimiento de los sitios se efectúa con base en el conocimiento de la existencia de cascadas en un determinado territorio y no con base sistemática. Con este fin, se necesitan investigaciones "in situ" para establecer las características siguientes:

- Geográficas del sitio.
- Efectivas de caudal, altura de cascada y transporte sólido.
- Técnicas de instalación.
- Topográficas de detalle.
- De los materiales locales para construcciones (tierra, materiales inertes, agua).
- De la accesibilidad al sitio con maquinaria a emplear en la construcción.

Con el fin de limitar las inspecciones tan sólo a los sitios que merezcan ulteriores estudios y profundizaciones, efectuamos, por lo general, evaluaciones aproximadas de los gastos de instalación y de productividad, lo que nos permite clasificar los sitios según un orden decreciente, del más al menos conveniente.

Es evidente que para establecer razonablemente el orden de magnitud de los costos de cada planta, se necesita disponer de una fotogrametría de detalle del sitio, que nos permita identificar un posible esquema de planta.

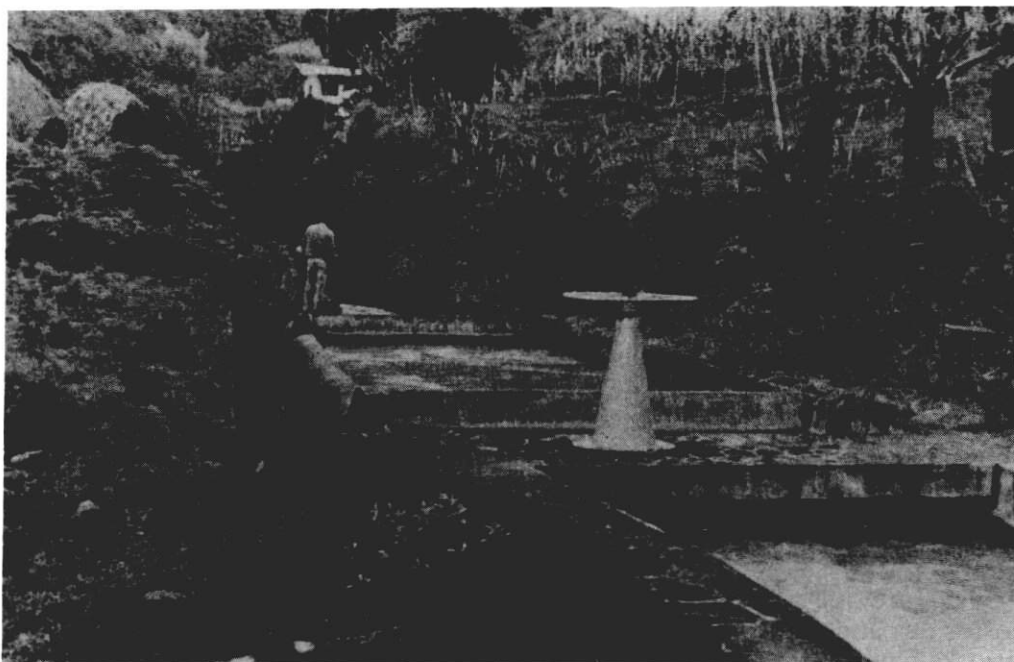
Los lugares faltos de fotocobertura se rechazan, por lo tanto, salvo que justifiquen el costo de un reconocimiento aerofotogramétrico y de fotorrestitución.

Finalmente resulta el siguiente mecanismo de evaluación:

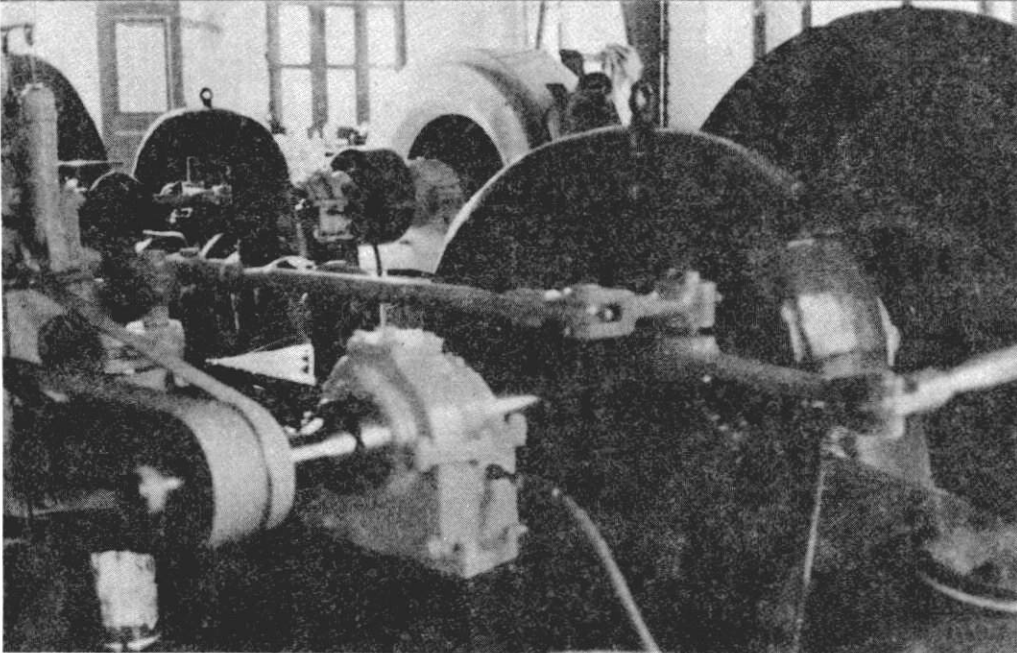
Los estudios de factibilidad son el conjunto de todos los datos recolectados paso a paso. En particular, para cada sitio se efectúa:

- El análisis de la demanda de energía.
- La hidrología.
- La geología.

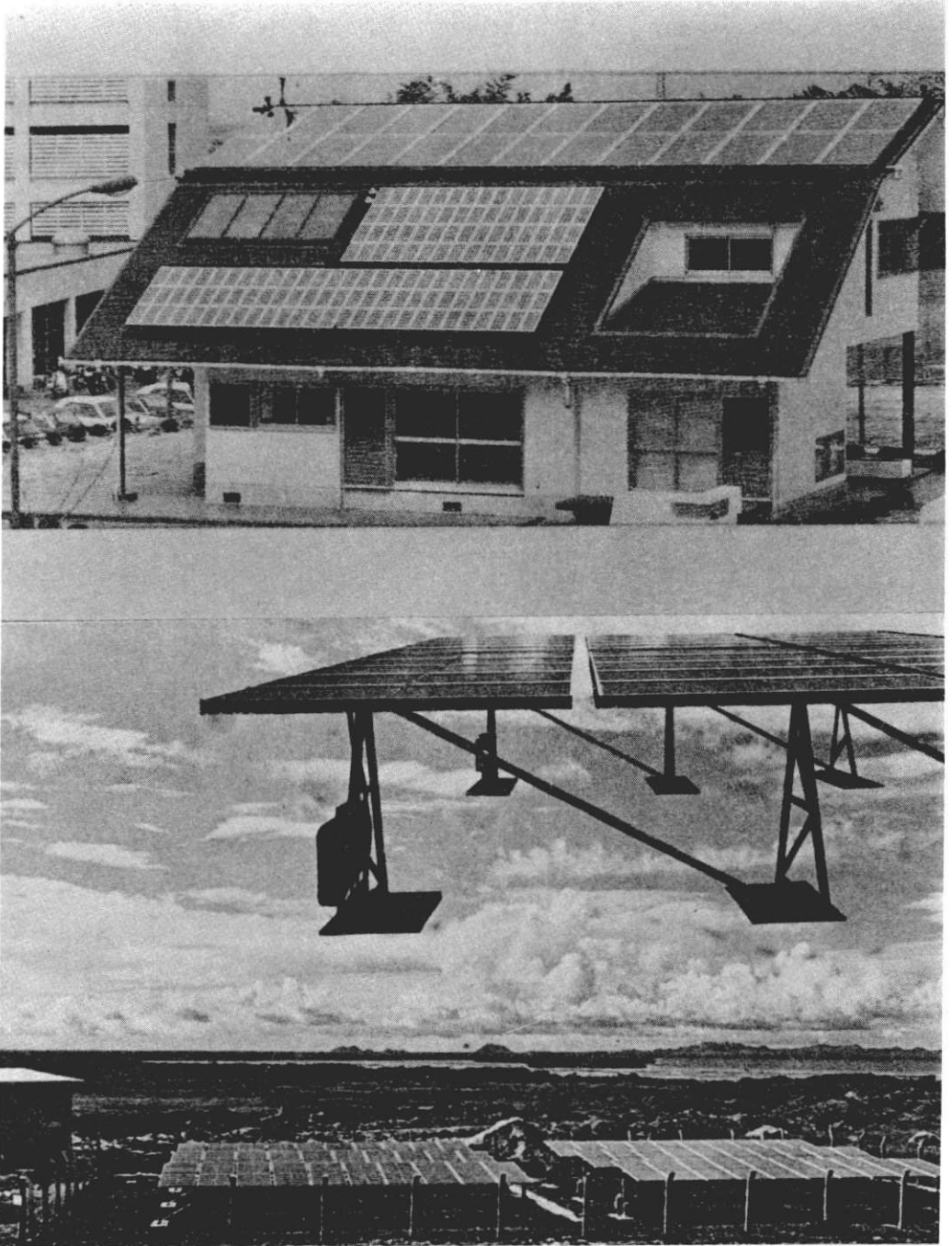
- La determinación de la oferta de energía, selección de la maquinaria y criterios de gestión de la planta.
- La identificación de soluciones técnicas.
- La evaluación de los costos.
- Los análisis económicos.
- El cronograma de realización.



Desarenador en un canal de conducción de pequeña central



Casa de máquinas de Central Río Abajo - Antioquia



*Aplicaciones típicas de las celdas fotovoltaicas*