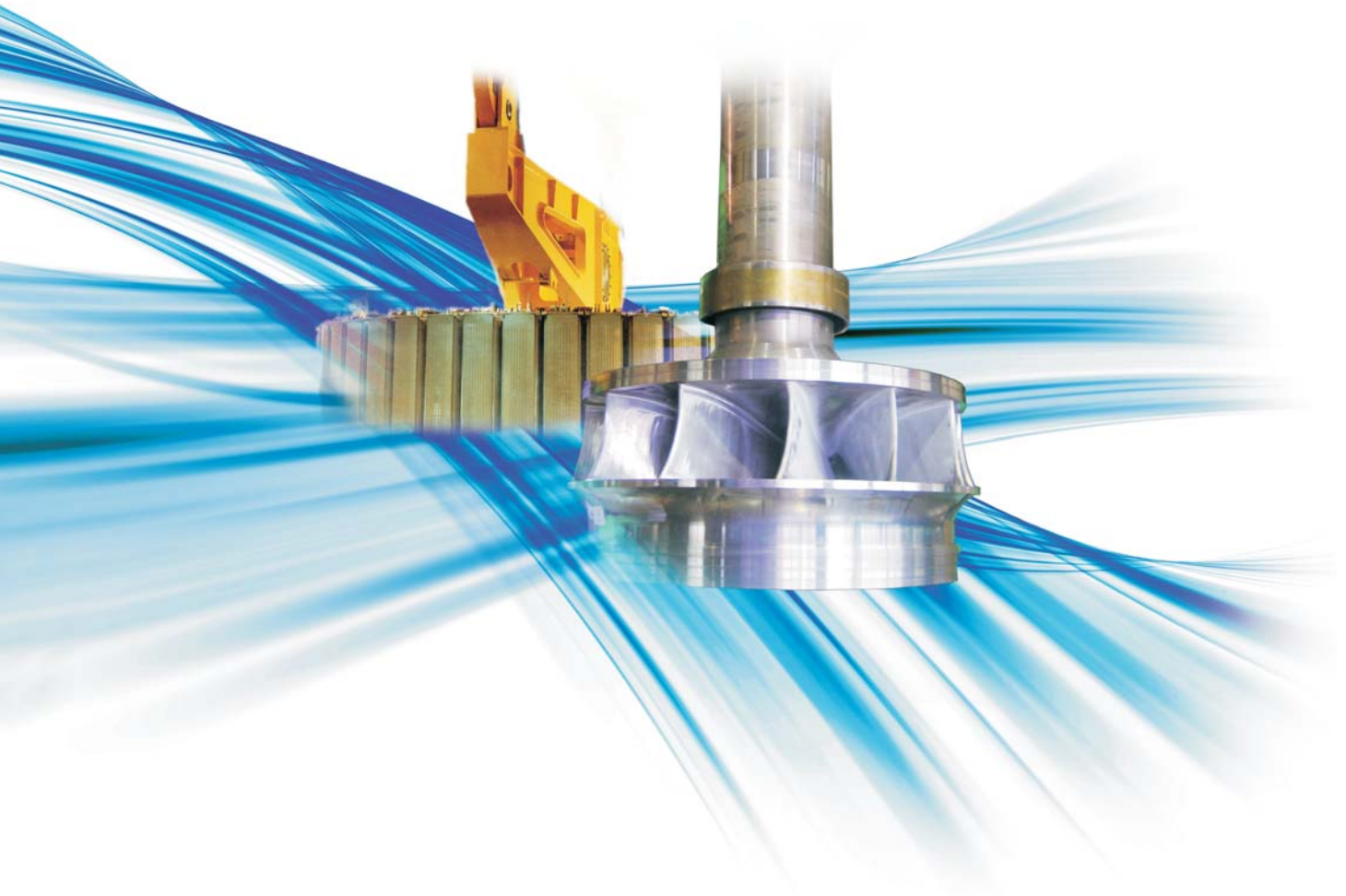


Proyecto Hidroeléctrico  
**BAKUN**  
Malasia

La central más eficiente del mundo



Creemos en la Fuerza de la Naturaleza

# Descripción del Proyecto

<b>Nombre</b>	Proyecto Hidroeléctrico Bakun
<b>País</b>	Malasia
<b>Cliente</b>	Sarawak Hidro Sdn Bhd
<b>Alcance</b>	Equipamiento "Llave en Mano"
<b>Capacidad Instalada</b>	2.800MW
<b>Producción Anual Promedio</b>	18.900 GWh
<b>Energía Equivalente</b>	83.000 BEP día

El aprovechamiento hidroeléctrico Bakun está ubicado en Sarawak, Malasia, a unos 60 Km al oeste de Belaga, sobre el río Balui, tributario del Rajang. Sigue los lineamientos del programa del Corredor de Energía Renovable de Sarawak (SCORE), que tiene por misión diversificar la matriz energética de Malasia aumentando la participación de las energías limpias. Este proyecto representó el primer paso para la utilización del potencial de 20.000 MW de la cuenca del Rajang.

La energía generada alimentará a las Provincias de Sarawak y Sabah, así como a la parte peninsular de Malasia a través de un cable submarino de 650 km de longitud tendido sobre el fondo del Mar de la China Meridional. Además existe la posibilidad de suministrar electricidad al Estado de Brunei y a Kalimantan, Provincia de Indonesia, ambos ubicados también en la Isla de Borneo.

Este emprendimiento cuenta con: una presa de enrocamiento con pantalla de concreto (CFRD) de 205 m de altura, la más alta del mundo en su tipo, y una longitud de coronamiento de 750m; una obra de toma y un aliviadero equipados con compuertas; 8 túneles de presión y sus respectivos conductos forzados y la casa de máquinas.

El alcance de suministro de IMPSA incluye la provisión del equipamiento electromecánico de la central bajo la modalidad llave en mano. La provisión incluye 4 de las 8 unidades generadoras tipo Francis de 350 MW cada una, con sus sistemas de regulación de velocidad y excitación, el sistema de control y protección, los transformadores de potencia principales y el balance de planta.

IMPSA obtuvo este contrato a través de una licitación internacional en donde sus turbinas tuvieron la mejor eficiencia. Esto se traduce en más generación de energía para Sarawak Hidro y por lo tanto mayor rentabilidad. Gracias a ésta ventaja técnica, el rendimiento global de la central es de 94%, convirtiéndola en la más eficiente del mundo. Cabe recordar, que la central térmica con mejor eficiencia es la de ciclo combinado, que alcanza como máximo el 60%. Otro dato relevante es el factor de planta excepcional con que cuenta el proyecto. Bakun permite el ahorro de más de 30 millones de barriles equivalentes de petróleo (BEP) por año y evita la emisión de gases de efecto invernadero, colaborando con la mitigación del calentamiento global y la disminución de la contaminación ambiental. De esta manera se preserva un recurso estratégico para la exportación.

Este proyecto fue el disparador para que IMPSA ampliara su planta en Lumut, costa oeste de Malasia, equipándola con máquinas herramientas muy modernas que le permitieron fabricar localmente componentes de alto valor agregado de las turbinas y generadores de Bakun. La materialización de esta provisión demandó la contratación de cerca de 500 colaboradores locales de diversas especialidades con la consecuente transferencia de tecnología a profesionales y técnicos malasios lo cual se logró a través del intercambio de importantes delegaciones de esta nacionalidad trabajando en Argentina y de argentinos en Malasia.



# Características Técnicas

## Turbinas

Tipo	Francis
Cantidad x capacidad	4 x 350 MW
Salto Nominal	172,4 m
Velocidad de rotación	1 66,7 rpm
Velocidad de Embalamiento	290 rpm

## Regulador de Velocidad

Tipo	Electro-hidráulico con control PID
------	------------------------------------

## Generadores

Cantidad x capacidad	4 x 396 MVA
Tensión de generación	18 kV
Frecuencia	50 Hz

## Sistema de Excitación

Tipo	Estático, con freno eléctrico
------	-------------------------------

## Transformadores de Potencia

Tipo	Trifásico
Cantidad x potencia	4 x 396 MVA
Tensión lado Generación	18 kV
Tensión lado Transmisión	290 kV
Tipo Enfriamiento	ODWF
Tipo de Conmutador	Bajo carga

## Sistemas Auxiliares Eléctricos

Interruptores principales de los generadores para 13.000 A - 18 kV
Transformadores de Servicios Auxiliares
Ductos de barras aisladas de los generadores para 13.000 A - 18 kV
Equipamiento de alta y baja tensión
Sistema de corriente continua y alterna seguras
Cableados completos
Sistema expuesto de puestas a tierra

## Sistemas Auxiliares Mecánicos

Sistema de agua de enfriamiento
Sistemas completos de aire comprimido en alta y baja presión
Sistema de vaciado de las unidades
Sistema de transferencia y tratamiento de aceite
Sistema de protección contra incendio para generadores y transformadores
Izajes para la sala de sistemas auxiliares mecánicos

## Sistema de Control y Protección

El sistema de control está constituido por 5 secciones principales:

Turbina	Alarma
Generador	Automatización
Servicios Auxiliares	

## Otros Equipos y Servicios

Repuestos para todos los equipos
Ensayo de modelo de turbinas en laboratorio de IMPSA en Argentina
Entrenamiento al personal del Cliente
Campamento e infraestructura para montaje y pruebas en obra
Montaje, pruebas en obra y puesta en marcha

## Turbinas



## Diseño Hidráulico

El ensayo del modelo reducido de la turbina de Bakun fue realizado en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT), de IMPSA, conjuntamente con representantes de Sarawak Hidro y expertos internacionales. El proceso de desarrollo incluyó: diseño hidráulico, diseño mecánico del modelo, ensayos internos hasta lograr los requerimientos del proyecto y ensayos presenciales junto a los representantes del Cliente. Las pruebas permitieron verificar el cumplimiento de las garantías para este proyecto en todos sus aspectos.

Todos los componentes de la turbina fueron inicialmente analizados y optimizados utilizando software de simulación de flujos (CFD), lográndose resultados consistentes con las mediciones realizadas durante el ensayo de modelo. Las turbinas fueron diseñadas para un rango de variación de saltos de más de 40 metros, lográndose altas eficiencias en todo el rango de trabajo de la unidad. El rendimiento pico de 96.30% es considerado el más alto del mercado para turbinas Francis.

## Diseño Mecánico

El diseño mecánico se realizó con un modelo 3D computarizado, el cual verifica las tensiones de los componentes, el análisis de deformación y las frecuencias naturales a través del método de elementos finitos (MEF).

La cámara espiral fue fabricada con chapas de acero soldadas, diseñadas para la máxima presión de trabajo. El predistribuidor está formado por dos placas paralelas y 19 álabes fijos soldados a éstas. Finalmente la cámara espiral fue presurizada en el sitio a 150% de la presión de diseño.

El distribuidor tiene 20 paletas operadas por 2 servomotores a través de un anillo de regulación; éstas son fundidas en acero inoxidable 13,4 y están equipadas con bujes auto lubricados.

El rodete fue fabricado a partir de componentes fundidos de acero inoxidable 13,4.

El diseño del eje es del tipo soldado de paredes delgadas, cuya inercia incrementa el margen de seguridad por velocidades críticas. También confiere a la máquina mejor estabilidad ante vibraciones y menor costo de fabricación.

Ya que la unidad funciona como un compensador sincrónico, se hicieron previsiones especiales en la cubierta superior y en el anillo inferior para inyección de aire y drenaje de agua.

Una vez convertida la energía hidráulica en mecánica, la turbina restituye el agua a través de un tubo difusor cilíndrico de chapa de acero soldada.



## Reguladores



El regulador IMPSA es del tipo electro-hidráulico digital con control tipo PID. La electrónica de control utilizada consiste en PLCs estándar de primera línea, lo que brinda alta confiabilidad y fácil mantenimiento. La arquitectura del sistema consiste en controladores redundantes, esto asegura una alta tolerancia a fallas y evita que, ante algún problema, la unidad generadora deje de operar, provocando un rechazo de carga y una gran perturbación al sistema eléctrico.

El software del sistema incluye todas las funciones de control de velocidad y potencia requeridos por este tipo de unidades.

El sistema de aceite a presión es del tipo aire/aceite. Cuenta con una unidad de bombeo con tres bombas de tipo tornillo para presurizar el sistema y un tanque aire/aceite con un volumen acumulado de aproximadamente 8.000 litros. La unidad de bombeo fue completamente diseñada en 3D.

## Automatización

El sistema de control de este proyecto abarca la supervisión, control y protección de las cuatro unidades generadoras que forman parte de la provisión de IMPSA. Cada unidad generadora cuenta con tres controladores principales.

El automatismo de cada unidad es el responsable de coordinar el funcionamiento seguro y sincronizado de todos los sistemas auxiliares del generador y de la turbina, entre los que se detallan: regulador de velocidad; regulador de tensión; sistemas de refrigeración del generador; cojinetes y sello del eje; válvula de guardia; sistemas de lubricación, frenado y aire comprimido; equipo de maniobra a tensión de generación; transformador de potencia principal.

Cada controlador está comunicado con el sistema de control total a través de su red S8000. Mediante ésta, además de proveerse de toda la información necesaria de la unidad generadora, se permite el comando remoto y la integración de todas las unidades a los módulos de control conjuntos de generación de la central. Estos controladores poseen capacidad de Secuenciamiento de Eventos (SOE) con resolución de 1 ms y sincronismo horario con referencia global GPS.

# Generadores

Su misión es convertir la energía mecánica de la turbina en electricidad y ello permite su transmisión a los centros de consumo. Son máquinas sincrónicas de polos salientes, trifásicas y de eje vertical, con una capacidad unitaria de 396 MVA, 166,7 rpm y una tensión nominal de 18kV. La potencia específica es de 10 MVA por polo, convirtiéndolas en máquinas de elevada complejidad tecnológica.

El dimensionamiento integral se efectuó por medio del sistema experto ARGEN, totalmente desarrollado por IMPSA, el cual permite también el análisis del comportamiento de la máquina, tanto en estado estacionario como transitorio y en condiciones normales y de falla. Esta herramienta sintetiza todas las capacidades necesarias para concebir un alternador de este tipo: electricidad, electromagnetismo, circuitos eléctricos y magnéticos, mecánica de los fluidos y transmisión de calor, elementos de máquinas, resistencia de materiales y fatiga, tribología (lubricantes-desgaste-cojinetes), estabilidad de la línea de ejes, vibraciones y comportamiento oscilatorio.

El diseño se hace por medio de CAD (Computer Aided Design). Para la verificación, no sólo se utilizaron herramientas desarrolladas en IMPSA e integradas en el sistema experto PROGEN, sino también programas que utilizan el MEF.

El circuito magnético del estator está formado por segmentos de acero magnético de grano orientado de 0,5 mm de espesor, que fueron troquelados, barnizados y apilados. En las ranuras se montó el arrollamiento estatórico, en el que se inducen un sistema trifásico de corrientes alternas. El conjunto es soportado por la carcasa, que es una estructura mecano soldada. Ésta guía el aire proveniente del núcleo hacia los intercambiadores de calor del sistema de enfriamiento.

El rotor consta de una estrella mecano soldada, una llanta de chapas troqueladas apiladas (para permitir una ventilación radial), y los polos inductores que generan el campo magnético rotante en el entrehierro de la máquina.

La disposición de la línea de ejes consta de un cojinete guía sobre el rotor del generador, un cojinete combinado debajo del rotor y un cojinete guía en la turbina. Esta disposición es muy conveniente desde el punto de vista de la estabilidad dinámica del rotor.

Entre las particularidades del diseño de Bakun encontramos su cruceta inferior de tipo membrana, la cual permite la transmisión de los esfuerzos radiales a la fundación, minimizando la longitud de la máquina. Esto significó un considerable ahorro en la estructura civil del proyecto.

El sistema de ventilación es de tipo radial asimétrico, el cual produce mediante el rotor la presión necesaria para el enfriamiento de la máquina.

## Sistema de Excitación

Está compuesto por:

**Sistema de regulación digital:** tiene dos autómatas, ambos ejecutando los canales de regulación manual/automático, y controladores de corriente de campo asociados a cada puente rectificador de SCR (tiristores). Esta estructura redundante 100%, garantiza un control independiente al nivel de entradas/salidas y canales de regulación, así como también al nivel de los controladores de corrientes.

**Sistema de control de potencia:** está formado por dos puentes rectificadores en configuración de reserva fría, a los efectos de garantizar una doble redundancia de potencia, pero sin poner en riesgo el resto de los SCR frente a una falla eléctrica cercana a los rectificadores. Cada rectificador posee su unidad de intercambio de calor aire/aire, así como sus sistemas de protección individual.

**Descarga de campo:** frente a una parada normal operativa, el sistema realiza una desexcitación rápida mediante la apertura del interruptor de campo. La energía almacenada en el rotor se descarga en un resistor.

**Transformador de excitación:** es del tipo de bobina encapsulada en resina epoxi y está protegido con su correspondiente celda, conectada al ducto de fases segregadas. Los transformadores de corriente en el primario permiten una protección contra sobrecorrientes.

Este proyecto es otro ejemplo del compromiso de IMPSA en brindar soluciones integrales para la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables.

# IMPSA

[www.impsa.com](http://www.impsa.com)

IMPSA LATINOAMÉRICA  
Camil Rodríguez Peña 2451  
M5503AHY, San Francisco del Monte  
Godoy Cruz, Mendoza  
Argentina  
Tel (+54 261) 413 1300  
Fax (+54 261) 413 1416

IMPSA MALASIA SDN BHD  
T2-8, 8th Floor, Jaya 33, N° 3 (Lot 33)  
Jalan Semangat, Section 13  
46100 Petaling Jaya, Selangor Darul Ehsan  
Kuala Lumpur  
Malasia  
Tel (+60 3) 7954 1168  
Fax (+60 3) 7954 1169

IMPSA RECIFE  
Estrada TDR Norte, 1724 Km 3,3  
Distrito Industrial de Suape  
Cabo de Santo Agostinho, PE - Brasil  
Cep.: 54590-000  
Tel (+55 81) 3087 9300  
Fax (+55 81) 3087 9372