



---

## **Energía no aprovechada en un tramo de río en la Cuenca del Plata en lo que va del siglo XXI**

**Lucas Federico Chamorro Vega**

**chamlucas@gmail.com**

**Entidad Binacional Yacyretá**

**Paraguay**

### **RESUMEN**

La Cuenca del Plata posee una capacidad hidroeléctrica muy importante, significando una porción relevante de la generación en los cinco países que tienen jurisdicción en la Cuenca. Los ríos de mayor potencial hidroeléctrico son los del Alto Paraná, Alto Uruguay y en menor escala el Paraná Medio. Los emprendimientos en tramos fronterizos son de gran importancia entre los existentes y los identificados. En relación a estos tramos cabe indicar que el total de potencia es de 29.590 MW, siendo que buena parte de ella está siendo aprovechada.

La Cuenca del Alto Paraná representa la principal cuenca de hidrogenación. En el 2004 el total de potencia instalada de las brasileras del Plata era de 38.371 MW con 39 centrales y 45% del potencial brasileño (Coelho et al 2004). En la matriz de oferta energética de los países la hidroenergía representa más del 75% de capacidad instalada para Brasil, Paraguay y Uruguay. Para Argentina es del orden del 50%.

El río Paraná es el más importante de la Cuenca del Plata debido a la magnitud de sus derrames, la extensión de su área tributaria y la longitud de su curso. A su vez es la segunda en importancia en Sudamérica, siendo uno de los ríos más caudalosos del mundo, cuyo aprovechamiento desde el punto de vista de generación eléctrica hidráulica está en el orden de 258.000 Gwh año, hacia la zona más inferior de la cuenca, la represa de Yacyretá es la última central de pasada hacia aguas abajo de la cadena de embalses de la cuenca del río en la actualidad, sin embargo existen tramos aún en los cuales se identifican potenciales aprovechamientos que bajo premisas del menor impacto ambiental y sustentabilidad continúan su competencia en el campo de los proyectos.

Es así que Corpus es un proyecto de usina localizada en el río Paraná entre las Centrales de Itaipú (14.000 MW) y Yacyretá (3.100 MW), con 2.880 MW (Pindo i) de Capacidad Instalada proyectada, e Itati – Itacora, con 1660 MW, localizado como proyecto identificado entre Yacyretá y la Confluencia de los ríos Paraguay y Paraná, ambos proyectos de tramo transfronterizo compartido entre Paraguay y Argentina, entre otras características el caudal registrado para dicho tramo entre los años 2.000 y 2.015 fue del orden de 14.100 m<sup>3</sup>/s, esta hidrología con este trabajo contabilizaría la energía no aprovechada en el periodo referido, atendiendo a lo proyectado para dichas usinas, la cual está en el orden de 10 veces la oferta energética hidroeléctrica anual del Paraguay.

### **PALABRAS CLAVES**

Cuenca - Caudal -Hidrogenación – Potencia Instalada – Energía-Proyectos-Oferta Energética

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objeto contabilizar la producción de Energía Primaria de Hidrogeneración y la no aprovechada, y en especial la Energía eléctrica que correspondería a la máxima producción continua de potencia que podría haber sido obtenida suponiendo la entrada en operación de los proyectos identificados y la ocurrencia de la secuencia de caudales registrados durante el período elegido en el tramo de río entre la Confluencia del río Paraná y el Iguazú, y entre el primero y el río Paraguay.

En el tramo se identificaron dos proyectos, uno aguas arriba del Complejo Hidroeléctrico Yacyretá (CHY) y el otro aguas abajo del mismo, para los cuales se recopilaban los datos técnicos existentes referentes a los mismos, a fin de simular la energía eléctrica que eventualmente hubiera sido producida en el periodo de registro de afluencias considerado en el tramo objetivado del río Paraná.

## 2. METODOLOGÍA

Para numerizar la hidroenergía que eventualmente se hubiera producido en el lapso de tiempo pasado en ambos emplazamientos identificados, se subdividieron los análisis, uno el de aguas abajo de Yacyretá denominado Itati- Itacorá y el otro Corpus aguas arriba de la CHY, para los cuales se utilizaron las características técnicas inventariadas expuestas en la Tabla I.

**Tabla I. Características técnicas de los Aprovechamientos**

<b>Aprovechamiento</b>	<b>Itati –Itacora (*)</b>	<b>Corpus (**)</b>
Lugar de Emplazamiento	Itati ( Arg) – Itacora (Py)	Pindo -i
Progresiva Fluvial (Km)	1.280	1.658
Capacidad Instalada ( MW)	1.660	2.880
Número de Unidades	32	20
Turbina	Bulbo	Kaplan
Salto Nominal (m)	11	21.3
Cota de Embalse mSNM	61	105
Cota de Restitución mSNM media( aguas abajo)	49.20	82.30

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

(\*) El proyecto Itati- Itacora cuenta con dos alternativas identificadas por COMIP (COMISIÓN MIXTA ARGENTINO PARAGUAYA DEL RIO PARANA), se eligió en esta propuesta la de menor área de embalse, en la cual la presa lateral derecha llega hasta la localidad de Cerrito (Py).Fig. 1



Fig. 1 Emplazamiento de Itati-Itacorá

(\*\*) El proyecto Corpus cuenta con tres alternativas propuestas por COMIP, para este estudio se determinó la de Pindoí por ser la de menor impacto ambiental o menor superficie de embalse. Fig. 2



Fig. 2 Emplazamiento Alternativa de Corpus en Pindoí

El caudal aportante se analizó desde dos puntos de vista, tanto el espacial como el temporal, con algunas hipótesis simplificadorias que en el proceso final tienen poca significancia para los cálculos finales, desde el punto de vista espacial se consideró la afluencia al embalse de Yacyretá como el caudal afluente medio diario tanto para el Emprendimiento Itati-Itacora, como para el de Corpus, en el de aguas abajo existen muy pocos afluentes (arroyos) entre el tramo de la CHY e Itati-Itacora, que el error sería despreciable por defecto, en el caso de Corpus, entre el mismo y la CHY existen también aportes laterales por ambos márgenes que en el conjunto crea un exceso hídrico con respecto al aporte al proyecto estudiado, sin embargo dichos valores son despreciables en relación a los órdenes de magnitud tratados (menor al 1%).

Desde el punto de vista temporal, se asumió como serie más moderna la relativa a los últimos 16 años, que corresponden desde la entrada del siglo XXI (2000 al 2015), además de contar con los caudales afluentes diarios, el caudal entrante a cada uno de los emprendimientos sería el mismo, no

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

siendo relevante el traslado de tiempo de la onda hídrica, dado que los cálculos realizados no son para fines operacionales sino con el propósito de planificación energética, cabe destacar que ambas centrales son centrales de pasada, si definimos al coeficiente de regulación como la relación entre el volumen útil del embalse y el volumen medio anual aportado por el río [1].

Para el cálculo de energía se utilizó la metodología en base a el diagrama de potencia [2], que reúne en las curvas anuales de persistencia todas las relaciones entre el caudal afluente natural, el caudal que pasa por la central, el régimen hidráulico, las variaciones de los niveles libres aguas arriba y aguas abajo de las instalaciones, las pérdidas de altura de salto, y las alturas de salto útil. Con estas curvas teniendo en cuenta cada vez el número de turbinas y su rendimiento se puede establecer la correspondiente curva de persistencia de potencias.

Para el caso particular de ambos proyectos estudiados se elaboraron los diagramas correspondientes, construyendo primeramente la curva de persistencia de caudales [3], con las curvas de restitución, de canal de fuga o curva clave de aguas abajo y los niveles de embalse, se calcularon los saltos brutos cronológicos que luego se llevaron al formato de persistencia de caudales, con las curvas colinares de las maquinas proyectadas, que fueron obtenidas de las publicaciones de la firma Andritz Hydro[4], de las turbinas Bulbo y Kaplan adaptadas para Itati-Itacora y Corpus respectivamente, con una suposición de operación a máxima carga sin sobrepasar los rangos temporarios de cavitación, Fig. 3 y Fig. 4. En base a dichas colinares se hallaron las curvas de caudal turbinado (m<sup>3</sup>/s) de una máquina tipo contra el salto neto (m) y también la potencia (MW) contra el salto neto Fig. 5 y Fig 6.

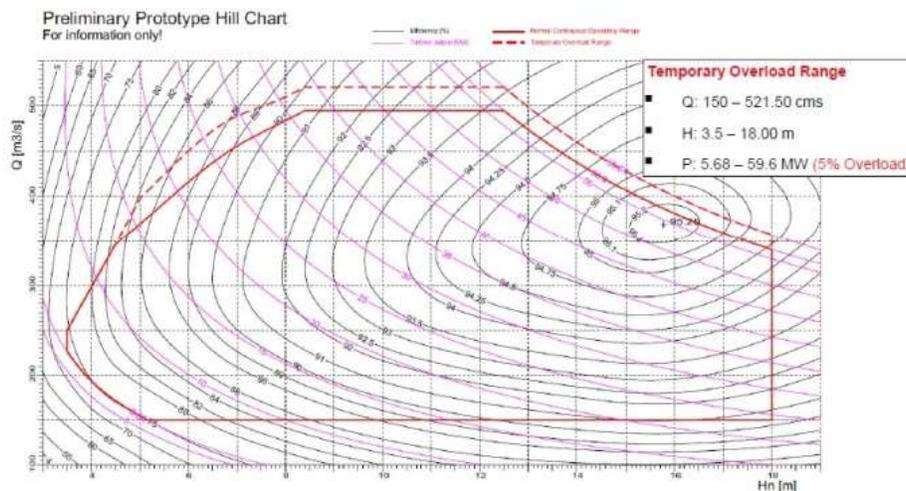


Fig. 3 Colina de la Turbina Bulbo adaptada para Itati Itacora

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

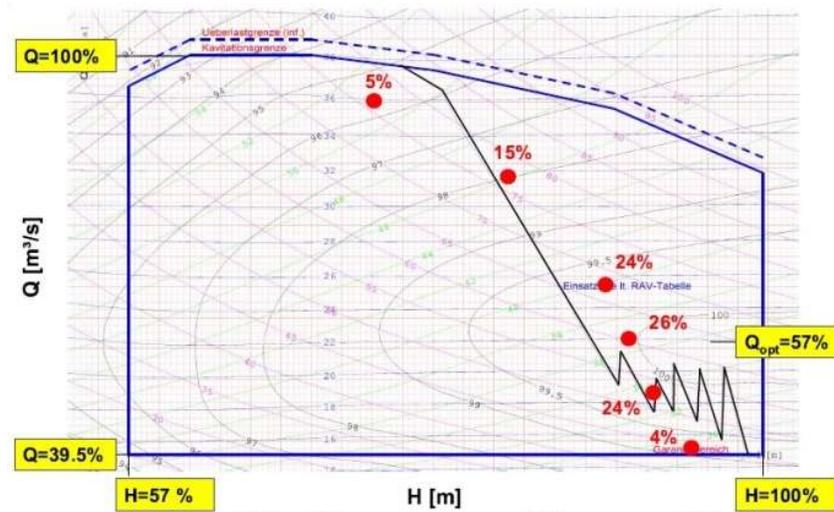


Fig. 4 Colina de la Turbina Kaplan adaptada para Corpus

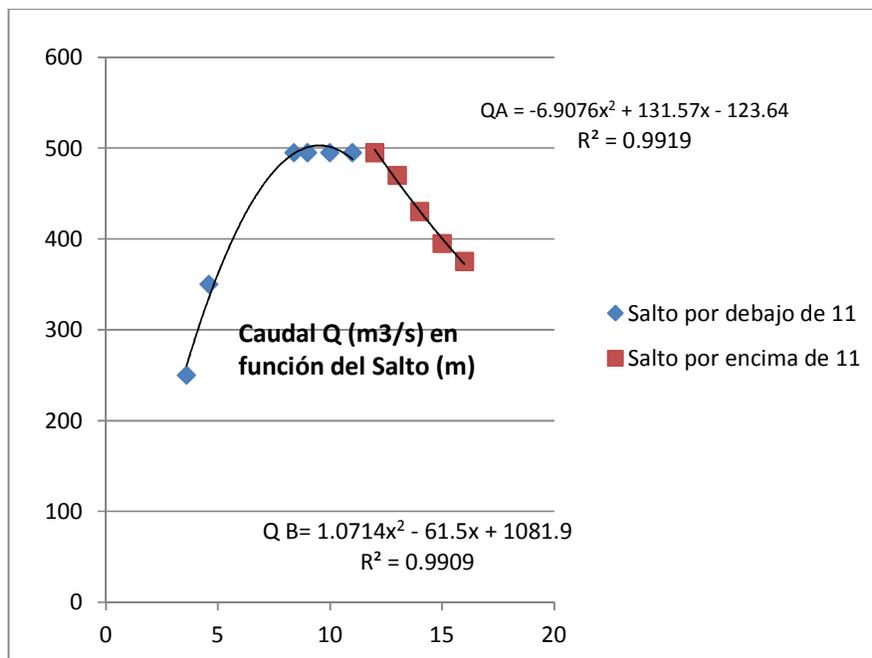
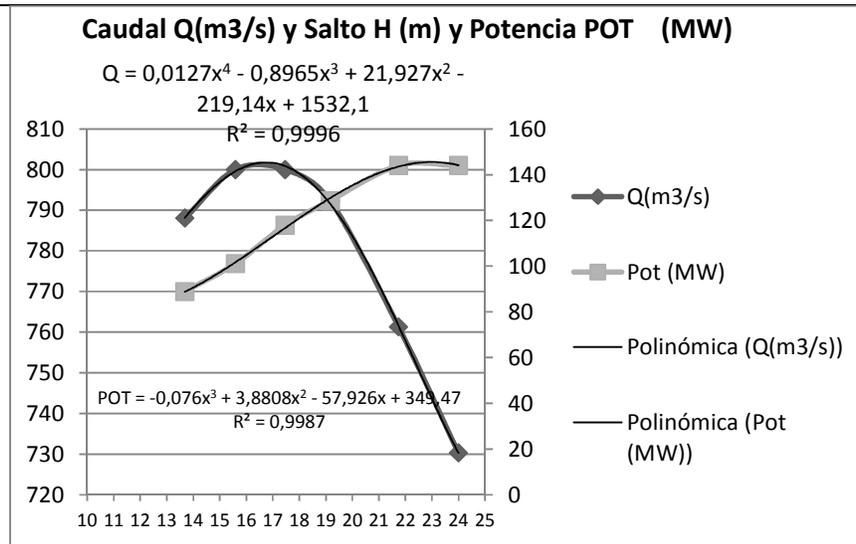


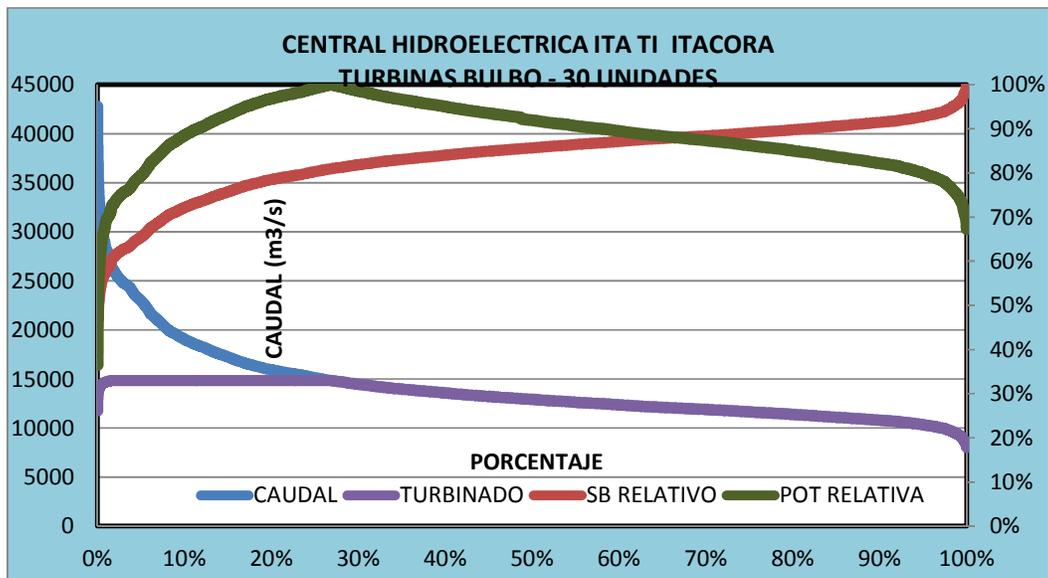
Fig. 5 Curva de Caudal Turbinado (m³/s) vs. Salto (m) de la Turbina Bulbo adaptada para Itati - Itacora

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

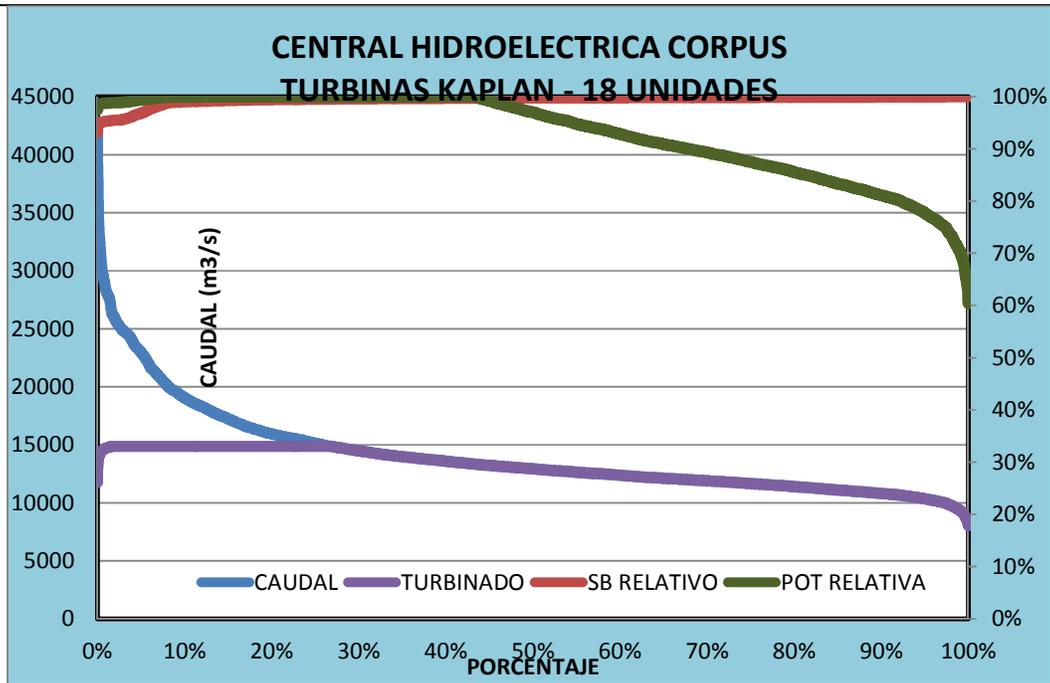


**Fig. 6 Curva de Caudal Turbinado (m<sup>3</sup>/s) vs. Salto (m) y Potencia (MW) de la Turbina Kaplan adaptada para Corpus**

Con las ecuaciones de regresión de las figuras 5 y 6, se obtuvieron los caudales turbinados de ambas centrales en función de la persistencia de salto y el número de máquinas con un criterio de disponibilidad de N-2 ( N es el número de turbinas instaladas en la planta), lo cual arrojó la persistencia de caudales turbinados de cada central y su vez para cada caudal turbinado de la persistencia y la curva de persistencia de salto, y así se obtuvo la curva de persistencia de Potencia de cada central hidroeléctrica estudiada, figuras 7 y 8 para Itati- Itacora y Corpus respectivamente.

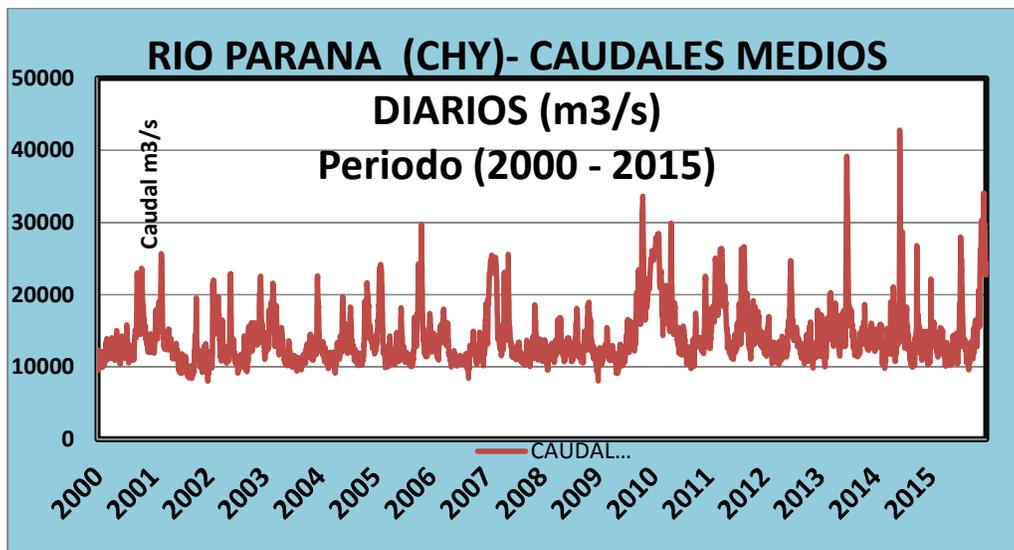


**Fig. 7 Diagrama de Potencia (MW) para la Central Itati Itacora**



**Fig. 8 Diagrama de Potencia (MW) para la Central Corpus**

Con el caudal afluente diario del periodo 2000-2015, cuya cronología se muestra en la figura 9, y las curvas de diagrama de potencia (Figuras 7 y 8), se obtuvieron las Potencias Diarias que multiplicadas por 24 hs, se calcularon las energías diarias de cada central, e integrando en forma diaria, se alcanzaron los valores anuales.



**Fig. 9 Curva Cronologica de Caudales Afluentes (m³/s) a los Emprendimientos**

## 1. RESULTADOS

La superficie del diagrama de potencias, o sea la superficie comprendida entre la curva de persistencia de las potencias y los ejes de coordenadas, representa la energía total anual promedio por día, con la metodología aplicada, los resultados alcanzados es decir la energía total anual calculada en el periodo estudiado son consistentes con los estudios de anteproyectos que se dispone de ambos proyectos. Los resultados se expresaron en TEP ( Toneladas Equivalentes de Petroleo ) en forma cronológica anual y acumulada en el periodo estudiado. Figuras 10 y 11.

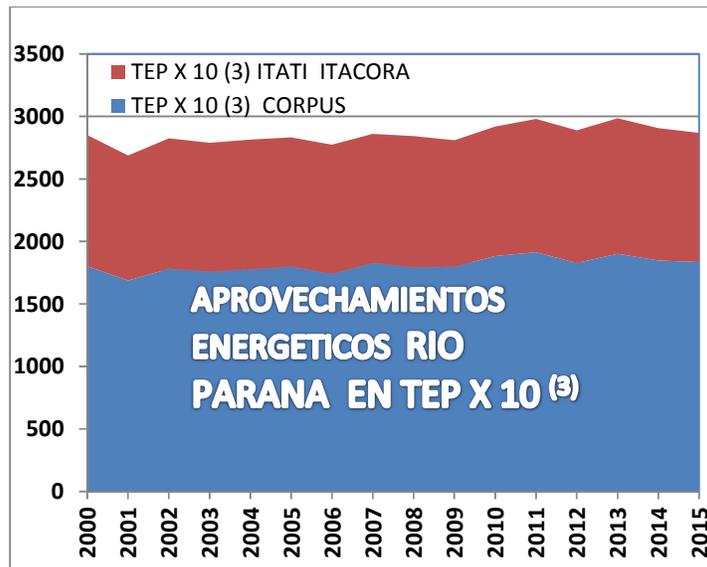


Fig. 10 Curva Cronologica de Energía Calculada en TEP

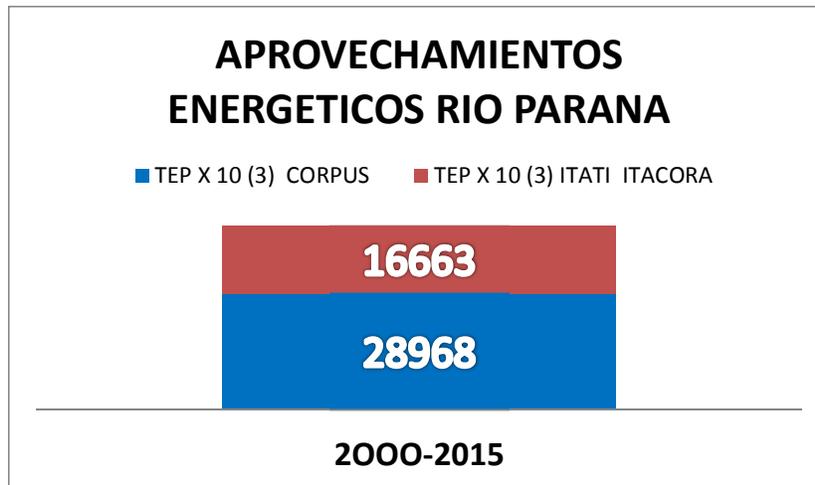


Fig. 11 Acumulado de Energía Calculada en TEP

Por otro lado a fin de hacer un analisis económico con un equivalente energético se utilizó como indice el precio del crudo Brent ( 1988-2015) de promedio anual del barril de petróleo de los datos

de Bloomberg y BEP ( Barriles equivalente de Petróleo ) que representa la energía equivalente a un barril de petróleo ( 159 litros) [5], cuyo resultado cronológico en millones de dolares americanos se expone en la Figura 12.

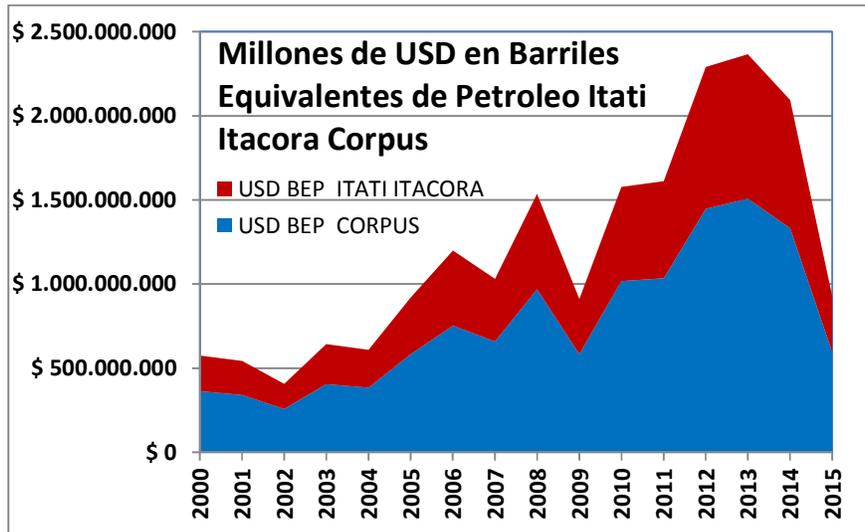


Fig. 12 Curva Cronologica en millones de USD ( United States Dollars) en Barriles Equivalentes de Petróleo para Itati – Itacora y Corpus

## 2. CONCLUSIONES

La metodología utilizada al ser coherente con los resultados de los estudios con series hidrológicas anteriores demuestra que este esquema resulta aplicable con una simplicidad relativa, en donde las variables estadísticas, las condiciones hidráulicas y las curvas de las colinares son los parametros necesarios para alcanzar los resultados que surgen como de utilidad para los procesos de planificación ( balances ), que adicionando los escenarios climaticos forzados por los GEI ( Gases Efectos Invernadero) y traducidos a variables hidrológicas de caudal darian la entrada para los calculos energéticos con propósitos de planificación energética o para medidas de mitigación y/o adaptación a la Variación y Cambio Climático, como por ejemplo a ser puestos en TEC ( Toneladas equivalentes de carbono), que de igual modo como se expresó en este trabajo los resultados, tanto en Tep y Bep, este último para tener los ordenes de magnitud de las figuras económicas en juego que acumuladas en el periodo de estudio estan en el orden de los 20.000 millones de USD, y por otro lado desde el energético según el Balance Energético Paraguayo 2014 [5], la leña como energía primaria cuya oferta anual,  $1.638,94 \times 10^3$  TEP (consumo industrial y doméstico) está en el mismo orden del entorno de la producción de energía primaria de Corpus para un año de baja hidraulicidad.



---

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Chamorro, F. Dure, “OPERACIÓN DEL EMBALSE DEL COMPLEJO YACYRETA A COTA REDUCIDA”Nº-CE –39.20 – Jun 2000.
- [2] Hutte . MANUAL DEL INGENIERO, DIAGRAMA DE REGULACIÓN, PRODUCCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA, pag 1206.
- [3] L. Chamorro. “ANALISIS DE LA PERMANENCIA DE CAUDALES AFLUENTES Y SALTO BRUTO A COTA DEFINITIVA EN LA CHY” XI SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ 24, 25 y 26 de Setiembre de 2014.
- [4] B, WyKrota,” USINA HIDRELETRICA DE SINOP- STATUS DE IMPLEMENTACAO DESDE PROJETO KAPLAN DE GRANDE PORTE”, Cigre Brasil, oct -2015.
- [5] F, Escudero, “ APUNTES DE MASTERADO DE GESTIÓN DE ENERGÍA “, Universidad Nacional de Itapua,pag, 4 , 88. Jun 2016.