



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

Titulo del Trabajo: **El ENSO en el Río Paraná y sus señales en la Operativa de la Generación Hidroenergética de la CHY**

Autor:

Nombre y Apellido: Lucas F. Chamorro V., ENTIDAD BINACIONAL YACYRETA.
Departamento Técnico
Sector Hidrología

Dirección de empresa o para contacto

Teléfono: (072) 222141 int 3210
Fax: (072) 222141 int 3209
E-mail: lucas.chamorro@eby.gov.py
PARAGUAY

Resumen:

El fenómeno ENSO (El Niño Oscilación del Sur), no como único forzante climático, está asociado a variaciones hidrológicas entre otras, a nivel planetario, y la excepción no es la Cuenca del Plata, ni tampoco la del Paraná, en consecuencia ante señales significativas del fenómeno mencionado en sus manifestaciones polarizadas, dado sus impactos (pluviométricos y fluviométricos) acotan ciertas operativas en el manejo de una Central Hidroeléctrica multipropósito y conducentemente en lo referente a la generación hidroeléctrica y los estadios o modalidades de uso de las estructuras de descarga de la misma.

La información histórica disponible a la actualidad, sumada a la experiencia acumulada en la operativa del embalse, en este caso de la CHY, posibilita caracterizar el patrón entre los fenómenos climáticos y la operación relacionada en una usina de hidrogenación ante índices no estacionarios del clima, determinados por centros especializados, además del estado de situación imperante a nivel de otros aprovechamientos en la Cuenca y concomitantemente es posible inferir comportamientos o escenarios ante la variabilidad climática y el cambio climático.

PALABRAS CLAVES

ENSO, Fenómenos Climáticos, Cuenca, Central Hidroeléctrica, Operación, Escenarios, Generación.



1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las grandes represas hidroeléctricas proporcionan el 10 % de la generación total de electricidad en 113 países. Constituyen en más del 20% de esta generación en 91 países y en más del 50% en 63 países.

En varios de los países que ya dependen altamente de la hidroelectricidad se está planificando la construcción de nuevos aprovechamientos hidroeléctricos, como en el caso de la Cuenca del Plata y en especial en la Cuenca del Paraná. Ello se debe a la necesidad creciente por una parte y por la otra que la relación entre Potencia instalada y demanda máxima es actualmente relativamente pequeña para una situación donde mayor parte del parque es hidráulico y por lo tanto susceptible de gran variabilidad por causas climáticas.

La potencia instalada en los países de la Cuenca del Plata en el año 2000 alcanzaba a 97.800 MW, de los cuales el 76% correspondía a hidráulicas. Por otra parte la potencia instalada era solo 1,34 veces mayor que la demanda, debido fundamentalmente al peso de Brasil dentro de los países de la Cuenca, tanto en la Potencia instalada como en la demanda máxima, a excepción de Paraguay donde dicha relación supera en el entorno de 5 veces a la media, lo cual da un claro matiz de país exportador de energía.

La baja relación, pone en crisis el abastecimiento en los casos de prolongadas sequías y es uno de los factores que hace necesaria la ampliación de la potencia instalada (Corpus, Aña Cua, Itacorá entre otros aprovechamientos en Paraguay, por ejemplo)

La producción de energía hidráulica se ve influenciada por la variabilidad de la precipitación, y esta cambia sus patrones regionales de acuerdo a varios forzantes climáticos imperantes en la región sur del globo terrestre, uno de esos factores de significancia encontrados es el ENSO.

Los cambios de la hidraulicidad entre otros factores intervinientes que afectan a la misma son de origen antropogénico, como el uso del suelo y la cadena de embalses, especialmente en la cuenca del Paraná, y las consecuentes del clima en primer orden, que favorecieron o no a la generación de energía hidráulica, dependiendo de cómo afecto no solo a la generación total sino su estacionalidad en relación con la demanda de electricidad, en los casos favorables el sector eléctrico se ve potenciado, sin embargo en los casos desfavorables, la vulnerabilidad del sector se pone de manifiesto claramente, en gran medida del porcentaje de generación hidroeléctrica.

La producción de energía eléctrica en MERCOSUR es potencialmente vulnerable al Clima, a sus cambios y variaciones, siendo esta una de las regiones del mundo de mayor vulnerabilidad, y en especial se ve disminuida su potencial de generación en los momentos de sequías.



2. METODOLOGIA

2.1 ASPECTOS INTRODUCTORIOS DE LOS FORZANTES CLIMÁTICOS

2.1.1 ENSO

El Niño / Niña oscilación del sur es un fenómeno cuasi periódico del patrón climático, que se extiende a lo largo del Océano Pacífico Ecuatorial, con un promedio anual de cada 5 años, pero el período varía entre los 3 y 7 años. El mismo está caracterizado por las variaciones de la temperatura superficial del océano, periodos de calentamiento y enfriamiento, denominándose el El Niño y la Niña respectivamente, y por las variaciones de presión del aire superficial entre el Este y el Oeste del Pacífico, del cual deriva la nomenclatura de Oscilación del Sur, ambos parámetros acoplados determinan el ENSO.

Las anomalías de signos opuestos entre los años (-) (con anomalías predominantemente secas) y (0) (con anomalías predominantemente húmedas), es el resultado de la tendencia de eventos La Niña y El Niño que ocurren en años adyacentes y es indicativo de una componente bianual de la Oscilación del Sur. La evolución de anomalías de precipitación durante el ciclo de EL Niño es el resultado de la interacción de anomalías de gran escala y baja frecuencia asociadas a EL Niño y del ciclo anual local de precipitación y su mecanismos, que son comunes en la parte oeste de la región sur de Brasil, nordeste de Argentina y Paraguay. (A. M. Grimm, 1998)

La fase caliente del ENOS, la mayor parte de Paraguay recibe lluvia por encima de lo normal desde septiembre a mayo, mientras que durante la fase fría del ENOS predomina lluvia por debajo de lo normal en el período de septiembre a noviembre en gran parte del país, y como también entre los meses de marzo a mayo en el norte, centro y sur de la región oriental. (Vazquez, 1998)

La correlación lineal múltiple entre las anomalías de caudales en Posadas durante el trimestre octubre-diciembre, las anomalías del Niño 3 durante abril-mayo y las anomalías de la temperatura de la superficie del océano Atlántico en la región comprendida 20° S - 5° S y 25° O - 40° O durante el trimestre julio – septiembre, arroja un coeficiente de correlación de 0,75. Estos resultados demuestran que existe una clara relación entre el Niño y los caudales y volúmenes de los ríos de la cuenca del Plata durante el verano y otoño. Esta relación tiene a vez un marcado impacto sobre la generación hidroeléctrica. (G. J. Berri, 1998)

2.1.2 OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO

La Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) sería el marco de fondo, desde el punto de vista oceanográfico y atmosférico, para otras oscilaciones de menor período, tal como el ENOS (El Niño/Oscilación del Sur). Las fases cálidas de la ODP están correlacionadas con el fenómeno de El Niño y, por el contrario, las fases frías, con La Niña.

Por su parte, el ENOS se compone de dos fases: las fases cálida y fría, conocidas popularmente como El Niño y La Niña, respectivamente. Ambos fenómenos tienen una duración mucho más corta que las fases de la ODP. La duración típica de las fases del ENOS oscila entre 1 y 2 años, mientras que las fases de la ODP son del orden de 20 a 30 años.

Las alteraciones climáticas más importantes en el continente americano sucederían cuando la ODP y el ENOS estén en fase. Es decir, cuando la fase cálida de la ODP coincida con el fenómeno de El Niño y, la fase fría, coincida con el fenómeno de La Niña.

Los fenómenos de El Niño tenderían a ser más débiles e infrecuentes, mientras que los fenómenos de La Niña serían más recurrentes, siempre y cuando la fase negativa (fría) de la ODP predomine durante los próximos años.

La última fase fría de la ODP estuvo activa de 1940 a 1970, durando aproximadamente 30 años. Sin embargo, es interesante mencionar que la última fase positiva de esta misma oscilación estuvo acoplada recurrentemente con fenómenos de El Niño en la década de los años noventa y a partir del año 1999 estaríamos ante una ODP negativa. Ver figura 1

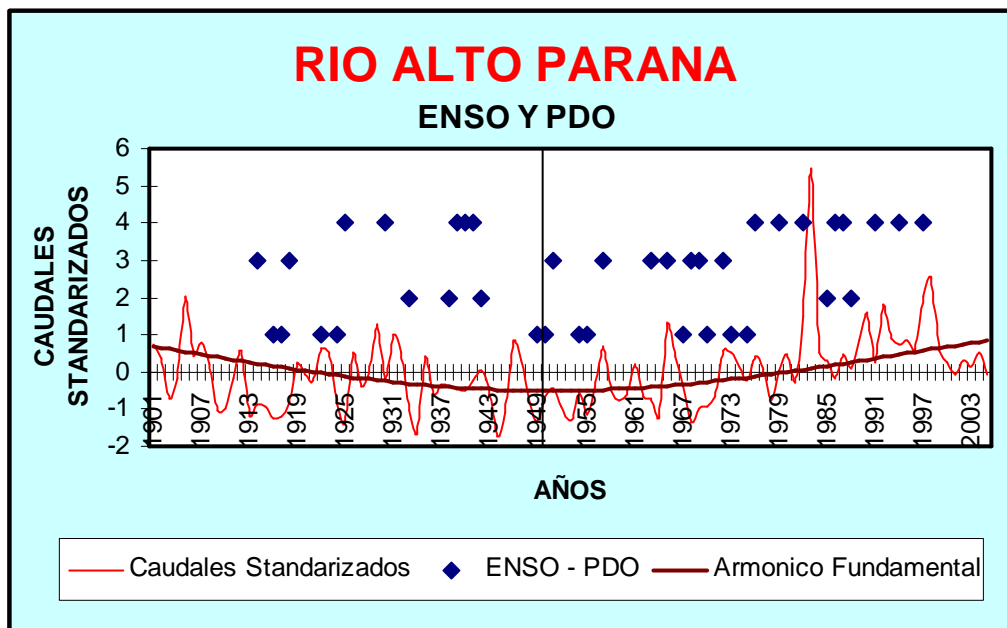


Figura1: En la misma se describe la variable bidimensional de los periodos ENSO y PDO (EN, LN y WPDO, CPDO) según una intensidad relativa configurada en la tabla 1, distribuida temporalmente en el Río Alto Paraná, relacionada a Caudales Standardizados y asociados a una tendencia de un armónico denominado fundamental.

Intradecadal	Fase ENSO	Interdecadal (PDO)	
		WPDO	CPDO
	EN	4	3
LN	2	1	

Tabla 1: Matriz bidimensional de los estratos Interdecadal e Intradecadal, del PDO (Warm PDO y Cold PDO, contra el ENSO(El Niño y la Niña).

2.2 ASPECTOS RELACIONADOS A LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA YACYRETA

2.2.1 CARACTERISTICAS DEL RIO PARANA

El Río Paraná, que nace en Brasil en la confluencia de los Ríos Paranaíba y Grande, unos 1.100 Km aguas arriba del aprovechamiento, es sin duda el río más importante del sistema hidrográfico del Río de la Plata, y es considerado como uno de los 7 mayores ríos del mundo debido a su caudal, a la extensión de su área tributaria, y a la longitud de su curso. A su vez esta cuenca es la segunda en importancia de Sudamérica. Siguiendo el curso del Paranaíba que es afluente principal, la longitud total aguas arriba alcanza los 2.300 Km aproximadamente.

La cuenca de aporte de Yacyretá tiene una extensión de casi 1.000.000 Km². A pesar de esta dimensión, desde el punto de vista hidrográfico es extraordinariamente homogénea por su uniformidad climática y geológica. La mayor parte de la misma se encuentra en zonas climáticas tropicales y subtropicales, sujetas a fuertes lluvias. Desde el punto de vista hidrológico se la divide en dos partes: La Cuenca Superior y la Inferior.

La Cuenca Superior es la que se encuentra aguas arriba de lo que eran los Saltos del Guairá. Está enteramente en el Brasil, y cubre unos 840.000 km². Está constituida por una extensa red de tributarios que se originan en las montañas del Sur – Este Brasileño. La porción Nor-Este, en forma de un gran anfiteatro, contribuye con la mayor parte del caudal del Paraná (en términos medios se genera el 77% de los derrames afluentes a la CHY).

La cuenca Superior está conformada por mesetas escalonadas con superficies planas cortadas abruptamente por empinadas escarpas. Consecuentemente, los cauces fluviales son característicamente escalonados, con tramos de pendiente relativamente baja, interrumpidos por rápidos y cascadas. Por su extensión y por su pendiente su reacción es relativamente lenta.

La Cuenca Inferior cubre un área del orden de los 135.000 Km²., y es geomorfológicamente similar a la Cuenca Superior. El Río Iguazú es el afluente más importante de la Cuenca Inferior (en términos medios aporta el 13 % de la afluencia a la CHY). Su cuenca tiene la forma de un rectángulo alargado, con una pendiente pronunciada, que se suaviza a medida que el río se acerca al Paraná. Su reacción es rápida.

La Cuenca Intermedia es una sub-cuenca de la Inferior, que tiene una superficie aproximada del orden de los 35.000 Km² y es la comprendida entre la confluencia del Río Iguazú con el Paraná y el eje establecido por las ciudades de Encarnación – Posadas.-

Desde principio de los años sesenta se aceleró fuertemente el ritmo de construcción de presas en toda la cuenca.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

En la actualidad, en el conjunto de estas presas se cuenta con un volumen de almacenamiento útil superior al 25% del derrame medio anual del Río Paraná en el Eje Encarnación- Posadas.

La presencia de las presas en la cuenca tiene fundamentalmente dos efectos principales y en cierta medida contrapuestos. Estos efectos son los siguientes:

Regulación del caudal por llenado y vaciado del volumen útil.

Reducción del tiempo de concentración de los aportes de las subcuencas y reducción del tiempo de traslación de crecidas.

La regulación del caudal tiende a aumentar los caudales mínimos y a disminuir los caudales de pico. La reducción de los tiempos de concentración y traslación provoca que los hidrogramas de crecidas sean de forma menos suave, con picos más altos.

Paralelamente con la construcción de las presas, la cuenca sufrió también otras modificaciones importantes que pueden estar influyendo en las características de sus derrames. Fundamentalmente, se ha alterado el uso del suelo debido a la masiva deforestación y a la práctica de técnicas agrícolas intensivas.

El Río Paraná ha transformado sus descargas históricas. Por ejemplo en la actualidad no son esperables caudales afluentes en el entorno del mínimo histórico.

2.2.2 OPERACIÓN DE LA CHY A COTA REDUCIDA

Las normas de operación del embalse están diseñadas de tal forma que por efecto de la sobreelevación que produce el remanso, aguas arriba, se pueda mantener o no superar (mientras las condiciones hidrológicas imperantes lo permitan) el nivel de restricción establecido para cada situación consignada. Las restricciones de aguas arriba están determinadas fundamentalmente por las relocalizaciones en las ciudades de Encarnación y Posadas.-

Las normas y procedimientos están definidas en el “ Manual de Operación y Mantenimiento “ y en el “ Manual de Operación del Embalse”, al estar las normas y procedimientos plena y claramente establecidas; las mismas condujeron a certificar a la CHY, con un sistema de control de calidad (NORMA ISO 9002) en “ Generación de Energía Eléctrica “, “ Operación y Mantenimiento de la Esclusa de Navegación “ y “ Operación del Sistema de Protección de la Fauna Ictica”, las cuales aseguran la calidad de la gestión de los recursos disponibles, centrada en el cliente, preservando el equilibrio del medio ambiente.

La Entidad Binacional Yacyretá decidió iniciar la operación comercial del proyecto Yacyretá a cota 76,00 (1994), y que transita por los estadios intermedios para luego pasar al estado definitivo de operación a cota 83,00, previsto para el año 2011 (Ver gráfico 2). Todas estas cotas son las que corresponden a las relocalizaciones en la Zona de Encarnación – Posadas (100 Km aguas arriba de la CHY).

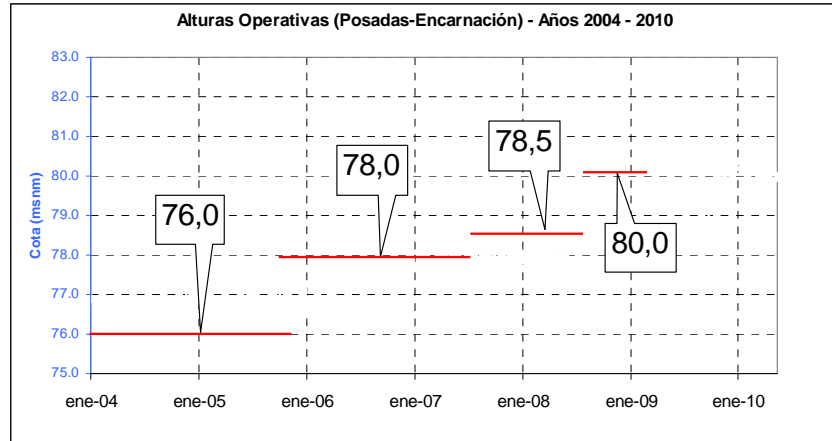


Gráfico 2: Operación a Cota reducida de la CHY

2.2.3 PRODUCCIÓN HIDROELÉCTRICA

Con el inicio de la operación de la Central Hidroeléctrica Yacyretá en 1994, la energía generada fue aumentando a medida que entraron en servicio las unidades generadoras, hasta totalizar 20 unidades generadoras instaladas, a mediados de 1998. Ver gráfico 3

CRONOGRAMA DE ENTRADA DE UNIDADES GENERADORAS:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1994									U01		U02	
1995	U03			U04	U05		U06			U07		U08
1996				U09	U10			U11		U12		U13
1997		U14			U15			U16		U17		U18
1998		U19		U20								

Gráfico 3: Cronograma de entrada de unidades generadoras

A cota definitiva (83 msnm), la energía media anual sería del orden de los 20.000 GWh.

Por otro lado con la inclusión del proyecto Aña Cuá, en donde se instalarán 3 (tres) unidades generadoras de 90 MW cada una (270 MW de Potencia Instalada), se aprovecharán los 1.500/1000 m³/s de descarga del caudal ecológico del brazo Aña cuá. De esta manera la Producción Anual del Complejo se incrementará en unos 2.000 GWh.

2.2.4 MODALIDADES DE OPERACIÓN

A partir de la decisión de operar el embalse de la CHY a cota reducida (76 msnm), surgen las características singulares de manejo de la misma, complementados por la operación de dos vertederos y otras estructuras de la CHY, la cual, en términos generales, es lo que técnicamente se denomina una “central *de pasada*”.

El volumen total de embalse a cota 80 (12000 Hm³) es pequeño respecto al aporte medio anual del río (391 Km³). Si definimos al coeficiente de regulación como la relación entre el volumen útil del embalse y el

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

volumen medio anual aportado por el río, se tiene para Yacyretá un coeficiente menor al 0.2 %. Este valor está en el mismo entorno que el de Itaipú sobre el mismo río y del orden de 10 veces menor a los coeficientes del embalse de Salto Grande sobre el río Uruguay y 100 veces menor al embalse del Chocon sobre el río Limay (RA).-

Se deduce claramente que no resulta posible regular el río Paraná a partir del embalse de Yacyretá.

Así mismo, con las turbinas en operación y en la medida que aumenta el caudal afluente, la prioridad de los criterios de descarga imponen en primer lugar el requerimiento del caudal mínimo ecológico del Brazo Aña Cua, en segundo lugar y hasta agotar su capacidad, se descargará por las turbinas de la Central. Por último toda excedencia que supere el caudal de saturación de la Central, en primera instancia se derivará a través del Vertedero Brazo Aña Cua y luego, según su magnitud, también por el Brazo Principal, surgiendo las modalidades operativas según la afluencia imperante, para las descargas que en consecuencia se operen como por ejemplo a) producto de la modulación de potencia y sin agotar la plena capacidad de la central, que para propósitos de este análisis lo clasificaremos en empuntada (restringida con rpf – regulación primaria de frecuencia - y rsf- regulación secundaria de frecuencia, máxima carga con rpf) y b) plena carga y sin modulación (máxima carga sin rpf, máxima carga con riesgo de vertimiento y máxima carga con vertimiento). Ver gráfico 4 modalidades a) y b)

Modalidad Operativa CHY (Máxima carga línea-empuntada claro)

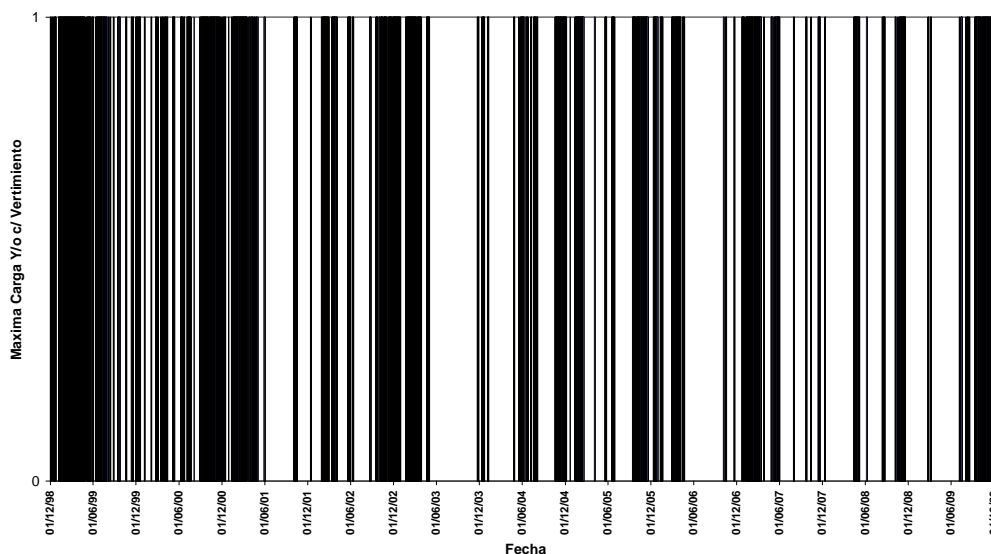


Gráfico 4: Diagrama de Modalidad Operativa Temporal

2.3 ANALISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

De acuerdo a las investigaciones anteriores y las propias se comprobó la correlación existente entre las precipitaciones en la cuenca del Paraná ya sea por exceso o déficit de las mismas según sea Niño o Niña respectivamente. Las consecuencias del impacto de las precipitaciones se traduce en mayor o menor escorrentía o caudales en el río Paraná, sin perder de vista, entre otros a factores acotantes de la escorrentía como la cadena de embalses de la cuenca sobre todo a la altura de la CHY, siendo esta la última de la cascada de más de 59 centrales hidroeléctricas, y por el otro el grado de uso de suelo (deforestación, agricultura), y en menor grado el cronograma paulatino de elevación del embalse de la CHY.



IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

Pero el propósito del analisis fue establecer el grado de relación de los casos ENSO y las modalidades operativas de la CHY que tengan alguna vinculación, para evaluar el predictor y el predictando. Se utilizó para ello la serie de informaciones de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), especialmente el Índice Oceánico del Niño (ONI) , el Indice Multivariado ENSO y SST (temperatura superficial del mar) Niño 3.4, y por el otro la serie de caudales del río Paraná (1901-2009) a la altura del Eje Encarnación Posadas, y por el otro las modalidades operativas de la CHY(1998-2009).

Se utilizaron funciones lógicas para aislar los casos de interés, se elaboraron matrices de contingencia en función a una estadística previamente elaborada, las cuales arrojaron las conclusiones pretendidas.

El análisis final comprendió evaluar los años ENSO coincidentes desde el inicio del periodo operativo de la CHY con todas las máquinas puestas a disposición hasta fines del 2009, encontrándose que durante dicho periodo se presentaron situaciones de ENSO débil, moderado y fuerte, siendo estos dos últimos los que arrojaron mejores resultados. Ver tabla 2

El Niño			La Niña		
Weak	Mod	Strong	Weak	Mod	Strong
1951	1986	1957	1950	1954	1955
1963	1987	1965	1956	1964	1973
1968	1994	1972	1962	1970	1975
1969	2002	1982	1967	1998	1988
1976		1991	1971	1999	
1977		1997	1974	2007	
2004		2009	1984		
2006			1995		
			2000		

Tabla 2: Fuente NOAA

3. CONCLUSIONES

Utilizando al ONI como índice predictor y especialmente para los caos de ENSO (moderado y fuerte), tanto para los casos del fenómeno cálido El Niño, como para los fenómenos fríos La Niña, los resultados fueron alentadores, en el sentido de encontrar una linealidad entre dichos índices y las formas operativas de la CHY, resultando que para el 94% del tiempo durante el período EL Niño (sobre los casos considerados 2009,2002) se operó a máxima carga y/o con vertimiento y durante el 91 % del tiempo durante el período de la Niña (2007,1999) se operó en empuntada o restringida, de lo que podemos concluir que cuando los fenómenos son intensos o moderados las formas operativas de la CHY están sesgadas por la influencia de este fenómeno climático en forma significativa, sin embargo cuando el fenómeno es débil los guarismos cambian a proporciones que se aproximan una a otra, igual situación se presenta en años denominados como neutro. Los resultados son de importancia sobre todo para la planificación de los paquetes energéticos estacionales y los programas de mantenimiento de las unidades generadoras cuando los índices climáticos son moderados y/o fuertes.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

4. BIBLIOGRAFIA

M. A. Vazquez M. A, La variabilidad de la precipitación en Paraguay y los eventos El niño/ Oscilación Sur (ENOS), 1998

G. J. Berri, El Niño y Algunos de sus Efectos Sobre los Recursos Hídricos en la Argentina, 1998.

A. M. Grimm, Influencia de El Niño sobre las lluvias del sur de Brasil, 1998

Harza y Consorciados; CIDY Consultores Internacionales de Yacyretá. Manual de Operación y Mantenimiento, Manual de Operación del Embalse, VOL. II – Rev 2., 1998

L.F. Chamorro, HIDROGENERACION – VARIABILIDAD CLIMATICA – ESCENARIOS, 2007