



---

## Estimación de composición de caudales turbinables hipotética en Complejo Yacyreta; Aña Cuá maquinizada y CHY repotenciada desde Operación a cota nominal

**Ing. Christian Ferreira Espinola**

E.B.Y. Departamento Técnico-Sector Operación. Área pre y post Operación

[christian.ferreira@eby.gov.py](mailto:christian.ferreira@eby.gov.py)

**Paraguay**

### **Resumen**

Estimación de caudales en Complejo Yacyreta, central Aña Cuá y CHY repotenciada.

Periodo comprendido entre enero del 2011 a diciembre del 2016.

Se realiza en este estudio una cuantificación de los caudales totales afluentes, turbinado, vertido ecológico y vertido efectivo a la Central Hidroeléctrica Yacyreta, luego se propone una estimación teniendo en cuenta las posibilidades de utilización del caudal afluente, a través de una teorización sobre el comportamiento que hubiera tenido el Complejo Yacyreta desde cota nominal incluyendo en los cálculos a la maquinización en Aña Cuá y la CHY repotenciada.

Para poder realizar el análisis se recurre a todo el registro disponible en el Sector Operación del caudal afluente, turbinado y vertido diarios en la CHY desde la operación a cota definitiva, en el periodo comprendido entre enero del 2011 hasta diciembre del 2016. Además del estudio de estimación de unidades posibles con caudal excedente, y otros registros estadísticos del sector.

En la primera parte se realiza la cuantificación real de todo el caudal afluente y la composición de la misma; caudal turbinado, vertido, vertido ecológico mínimo. Todos los caudales referidos son sumatorias de caudales promedios diarios, teniendo en cuenta que la CHY es una central de pasada, por lo que todo el caudal afluente en el día necesariamente debe ser descargado para mantener el nivel del embalse.

A través de los cálculos presentados se tiene una muestra de todo el potencial y la cantidad de agua que se hubiera podido aprovechar en caso de contar con Aña Cuá Maquinizada y también las posibilidades de utilización del excedente en la CHY a través de más unidades disponibles.

La estimación sobre el caudal necesario para el agregado de más unidades en funcionamiento en CHY, está referida al caudal turbinado diario promedio en mismas condiciones de operación presentes en cada día del periodo, para esto se promedia el caudal turbinado real y se extrapola este mismo valor para más unidades, tomándose 23 unidades como máximo, por lo tanto caudales superiores al necesario para las unidades posibles de ese día, no podrían ser turbinados bajo esa misma condición operativa.



Comité Nacional Paraguayo Unión de Ingenieros de ANDE

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
06 y 07 de Setiembre de 2018

En segunda instancia se realiza el mismo procedimiento pero modificando el caudal mínimo en Aña Cuá, con lo que tenemos dos condiciones operativas para Aña Cuá, y la afectación en cada caso a la operación en la CHY.

En los resúmenes de tablas con los respectivos registros y cálculos diarios en el periodo, los valores están conformes a las planillas de registro de datos del Sector Operación.

Las estimaciones de utilización teórica posible del caudal afluyente están referidas al modo de operación presente diario en el periodo. Todos los valores utilizados son promedios diarios.

Los cálculos se realizan con el criterio de redondeo por defecto, esto es para presentar las condiciones más desfavorables, básicamente pequeñas variaciones en la operación podrían dar lugar a estimaciones más optimistas; modificando algunas variables controlables como la potencia, caudal turbinado, modo de operación, se tendría la posibilidad de mejorar las estimaciones presentadas.

Se recurre al uso de gráficos y tablas, con lo que podemos fácilmente observar el potencial desaprovechado hasta la fecha, pero también las enormes posibilidades energéticas que se podrían tener realizando posteriormente extrapolaciones a condiciones futuras similares.

El resultado de las estimaciones bajo las condiciones teorizadas presenta que el aprovechamiento real como caudal Turbinado por la CHY en el periodo correspondiente al 76,2% del caudal afluyente, pasaría en promedio a un 93% del afluyente en el caso de la operación de la CHY repotenciada más Aña Cuá maquinizada.

***Palabras clave***

CHY (Central Hidroeléctrica Yacyreta), Aña Cuá, Operación, Caudal afluyente, Caudal turbinado Vertido, Unidades generadoras, Potencia.

**BIBLIOGRAFIA**

- Informes Mensuales Sector Operación Enero a Diciembre. Entidad Binacional Yacyreta-Dpto Técnico, Paraguay-Argentina, 2011/2012/2013/2014/2015/2016, páginas 01-30.
- Registro de Caudales Diario/Mensual/Anual Sector Operación Enero a Diciembre. Entidad Binacional Yacyreta-Dpto Técnico, Paraguay-Argentina, 2011/2012/2013/2014/2015/2016.
- Registro de Horas de funcionamiento de unidades Diario/Mensual/Anual Sector Operación Enero a Diciembre. Entidad Binacional Yacyreta-Dpto Técnico, Paraguay-Argentina, 2011/2012/2013/2014/2015/2016.

**1. Estimación de composición de caudales turbinables hipotética en Complejo Yacyreta; Aña Cuá maquinizada y CHY repotenciada desde Operación a cota nominal**

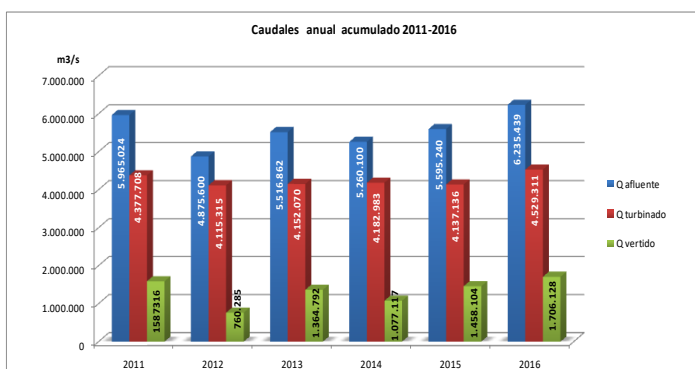
1.1 Caudales totales, al embalse desde 2011 a 2016 condición Q Aña Cuá 1000 m<sup>3</sup>/s mínimo.

Se presentan las tablas y gráficas de los caudales de todo el periodo, en donde se puede observar la distribución de los caudales como sumatoria de los caudales promedios diarios, y la composición del caudal afluente que se ha transformado en energía eléctrica, correspondiente al caudal turbinado.

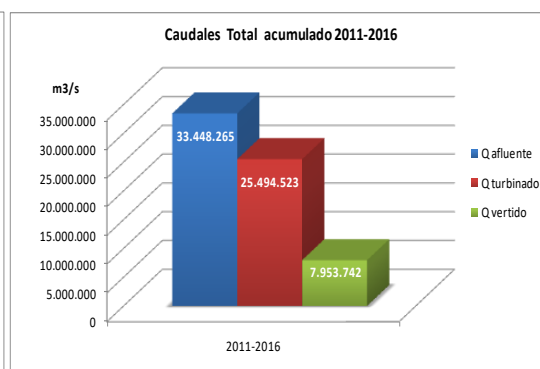
**Tabla I: Composición de caudales; afluente, turbinado y vertido en CHY (m<sup>3</sup>/s)**

En esta tabla se tiene un resumen cuantificado de la sumatoria de caudales diarios promedios en el periodo.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total
Q afluente	5.965.024	4.875.600	5.516.862	5.260.100	5.595.240	6.235.439	33.448.265
Q turbinado	4.377.708	4.115.315	4.152.070	4.182.983	4.137.136	4.529.311	25.494.523
Q vertido	1.587.316	760.285	1.364.792	1.077.117	1.458.104	1.706.128	7.953.742

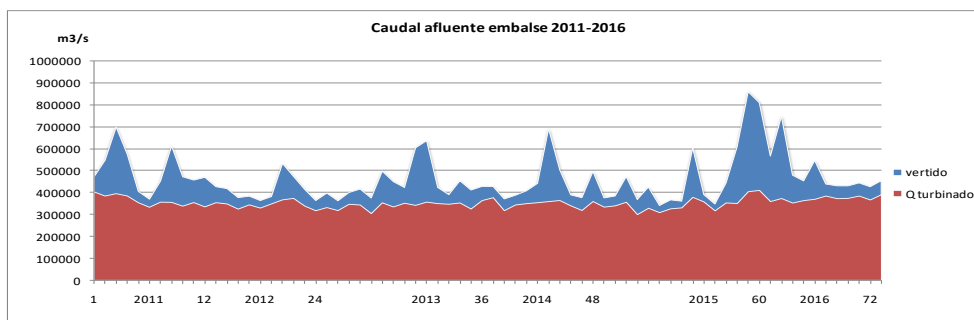


**Figura 1: Caudales anuales acumulado**



**Figura 2: Caudales total acumulado**

El caudal Turbinado de **25.494.523 m<sup>3</sup>/s** se corresponde al 76,2% del total afluente, y el caudal vertido es el restante 23,8% del afluente.



**Figura 3: Caudales vertido y turbinado, componentes de todo el caudal afluente.**

## 2.1 Distribución del caudal afluente

En la CHY el excedente del caudal afluente que no puede turbinarse debe ser erogado a través del vertedero Brazo Principal (VBP) y el vertedero Brazo Aña Cuá (VBAC). Para los modos de operación de la CHY se toma el valor límite de 1000 m<sup>3</sup>/s como Caudal mínimo por VBAC, por encima de éste valor la CHY declara el modo de operación en “Vertimiento”.

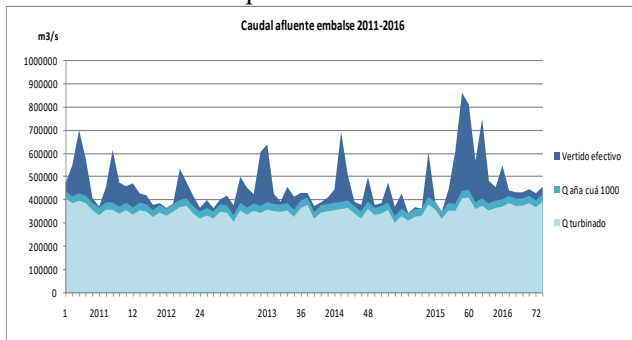


Fig. 4: Caudales vertido efectivo y Q Aña cuá

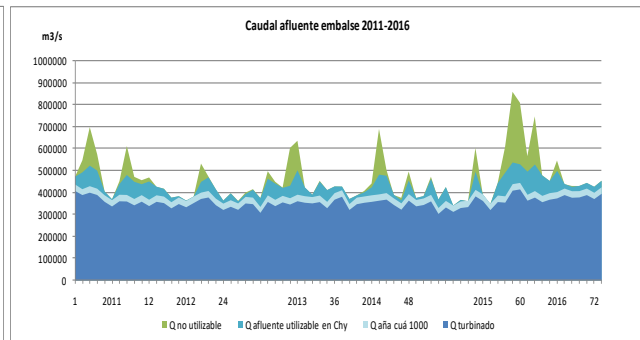


Fig. 5: Q Aña cuá, Q Utilizable en CHY y Q no útil

En la Fig 4) El Q turbinado es el Caudal turbinado real en el periodo. El Q Aña cuá 1000 se corresponde al Caudal mínimo de 1000 m<sup>3</sup>/s turbinable en Aña Cuá, y el Vertido efectivo es todo el caudal vertido que excede los 1000 m<sup>3</sup>/s en la CHY, incluyendo los dos vertederos.

En la Fig 5) El Q turbinado es el Caudal turbinado real en CHY. El Q aña cuá 1000 se corresponde al Caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s por Aña Cuá; el Q afluente utilizable en CHY es el Caudal utilizable con el agregado de tres unidades generadoras en casa de máquinas de CHY, y el Q No utilizable es el Caudal que no podría ser aprovechado al exceder el correspondiente al necesario para un máximo de 23 unidades generadoras en CHY más 1000 m<sup>3</sup>/s. por Aña Cuá.

De la Fig 4 se puede apreciar el vertido que hubiera podido ser aprovechado a través de la maquinización proyectada en Aña Cuá y con la repotenciación en casa de máquinas de la CHY con el agregado de más unidades generadoras. En la Fig 5 se tiene la composición de estos caudales, en donde se puede ver el caudal correspondiente al agregado de tres unidades en la CHY y la operación al caudal mínimo de 1000 m<sup>3</sup>/s. por Aña Cuá maquinizada.

### 2.1.2 Distribución de caudales aprovechables

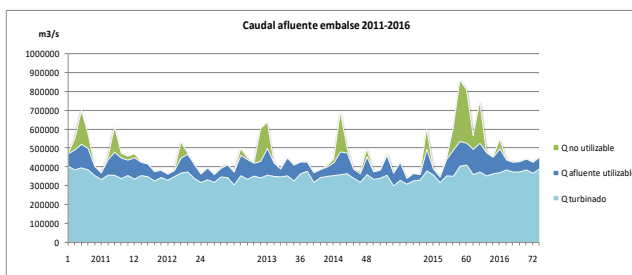


Fig. 6: Caudales turbinado real, Q utilizable y Q no útil

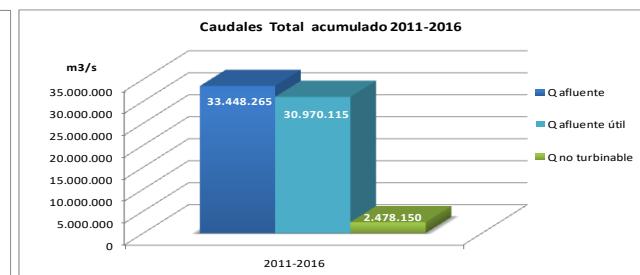


Fig.7: Distribución teórica en periodo

Los picos de caudal no utilizable corresponden a las temporadas de crecientes excepcionales en donde el caudal supera el que necesitarían las unidades en servicio posible hasta un máximo de 23 unidades en la CHY más los 1000 m<sup>3</sup>/s por Aña Cuá.

### 2.1.3 Distribución de caudales anual del periodo 2011-2016

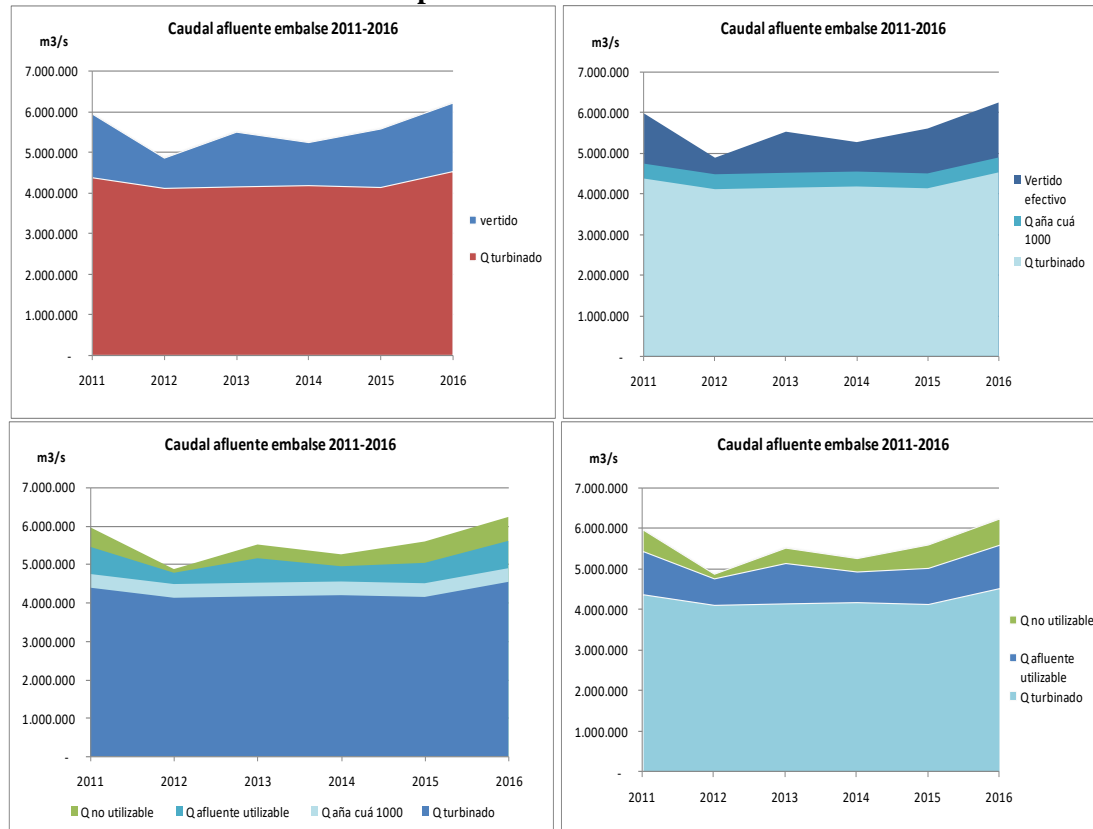


Fig. 9: Resumen de Distribución de caudales anual real y teorizada en periodo 2011-2016

Tabla II: Resumen de composición de caudales

Caudales m³/s	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total	% del afluente
Q afluente	5.965.024	4.875.600	5.516.862	5.260.100	5.595.240	6.235.439	33.448.265	
Q afluente útil	5.450.997	4.776.017	5.154.817	4.945.819	5.034.832	5.607.633	30.970.115	<b>92,6%</b>
Q turbinado real 20U	4.377.708	4.115.315	4.152.070	4.182.983	4.137.136	4.529.311	25.494.523	76,2%
Q utilizable CHY+3U	708.289	294.702	637.747	397.836	532.695	713.322	3.284.592	9,8%
Q Año Cuá 1000	365.000	366.000	365.000	365.000	365.000	366.000	2.192.000	6,6%
Q no turbinable	514.027	99.583	362.045	314.281	560.408	627.806	2.478.150	<b>7,4%</b>

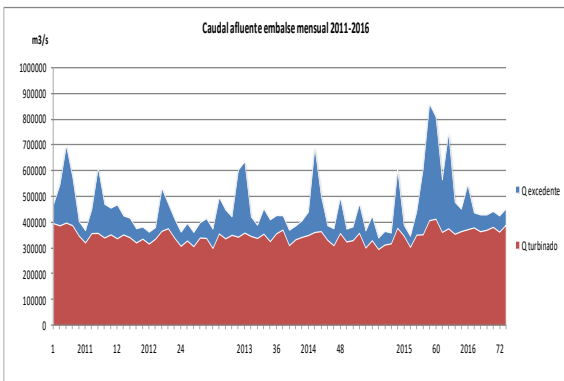
El caudal afluente utilizable bajo las nuevas condiciones teorizadas llega a **92,6%** del total afluente y el no turbinable o vertido es el restante **7,4%**, notándose una sustancial mejoría con respecto al turbinado y vertido real en el periodo que es del **76,2 y 23,8%** respectivamente.

**3.1.1 Caudales totales al embalse desde 2011 a 2016 condición Q Año Cuá 1500 m<sup>3</sup>/s mínimo.**

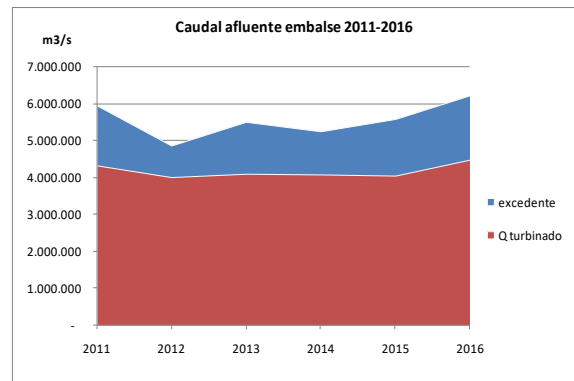
Se presentan las tablas y gráficas de los caudales de todo el periodo, con la consideración como caudal mínimo en Año Cuá de 1500 m<sup>3</sup>/s, el caudal turbinado es compensado en los días de poco caudal en el que para poder operar más unidades teorizadas es necesario disminuir el caudal tubinado promedio en CHY. Restando del turbinado real lo correspondiente para obtener la descarga calculada.

Con la modificación teorizada de 1500 m<sup>3</sup>/s permanentemente en Año Cuá se obtienen valores menores que el real para el caudal turbinado total anual por la CHY, pero en contra partida con el agregado a los cálculos de la CHY repotenciada se tiene luego un aprovechamiento aún mayor del caudal afluente total al embalse que el obtenido para la descarga de 1000 m<sup>3</sup>/s por Año Cuá obtenida anteriormente.

**3.1.2 Caudales acumulados 2011-2016**



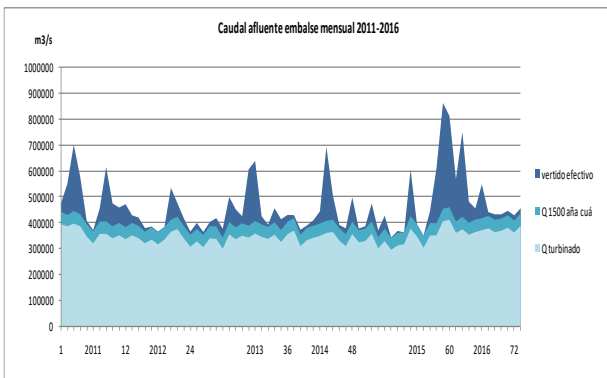
**Fig. 11: Nueva Distribución de caudales teorizada**



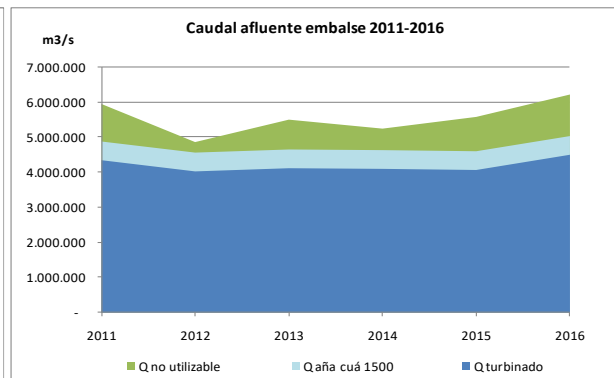
**Fig. 12: Distribución teórica en periodo**

El caudal turbinado es el considerado sin el agregado de más unidades a la CHY, resultando éste caudal turbinado calculado el 75% del afluente, el caudal real es igual al 76,2% del afluente. La diferencia presentada es del 1,2% del afluente.

**3.1.3 Distribución caudales con caudal en Año cuá 1500 m<sup>3</sup>/s.**



**Fig. 13: Nueva Distribución de caudales teorizada**



**Fig. 14: Distribución teórica en periodo**

En las gráficas se tiene discriminado la parte del caudal necesario para la condición permanente de 1500 m<sup>3</sup>/s por Aña Cuá y el vertido efectivo es la parte del caudal afluente que no sería utilizado si no se tiene la CHY repotenciada.

El caudal por Aña Cuá es mayor por la condición impuesta, en donde para 1500 m<sup>3</sup>/s tenemos que representa el 9,8% del afluente, mientras que para 1000 m<sup>3</sup>/s es de 6,6%. La diferencia en este caso es positiva e igual a 3,2% del afluente.

### 3.1.4 Distribución de Caudales con CHY repotenciada con 3 unidades generadoras.

En los gráficos siguientes se tiene la composición de caudales en el caso de tener la CHY repotenciada con 3 unidades en servicio.

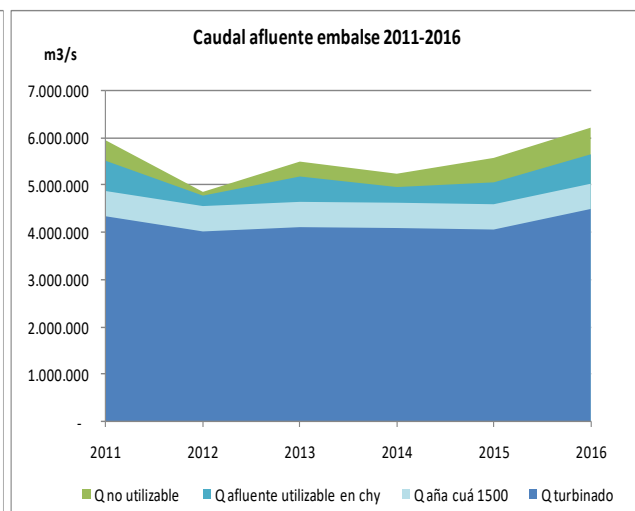
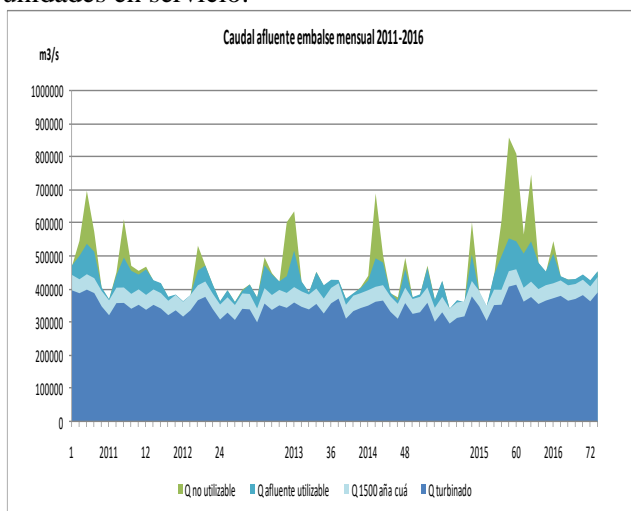


Fig. 15: Caudales teorizado con Año cuá 1500 m<sup>3</sup>/s

Fig. 16: Distribución en periodo con año cuá 1500 m<sup>3</sup>/s

El caudal utilizable en CHY es el 8,5% del afluente, el obtenido en la condición de 1000 m<sup>3</sup>/s por Aña Cuá fue de 9,8%. La diferencia es del 1,3% del afluente.

#### 4.1.1 Tabla III: Resumen de composición de caudales teorizada

Caudales m <sup>3</sup> /s	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total	% del afluente
Q afluente	5.965.024	4.875.600	5.516.862	5.260.100	5.595.240	6.235.439	33.448.265	
Q afluente útil	5.523.843	4.788.607	5.193.720	4.970.293	5.069.832	5.663.190	31.209.484	<b>93,3%</b>
Q turbinado 20U	4.332.908	4.014.715	4.105.270	4.086.683	4.054.911	4.487.772	25.082.259	75,0%
Q utilizable en chy +3U	643.435	224.892	540.950	336.110	467.420	626.418	2.839.226	8,5%
Q año cuá 1500	547.500	549.000	547.500	547.500	547.500	547.500	3.286.500	9,8%
Q no turbinable	441.181	86.993	323.142	289.807	525.408	572.249	2.238.781	<b>6,7%</b>

#### 4.2.1 Gráfico de Resumen de composición de caudales teorizada

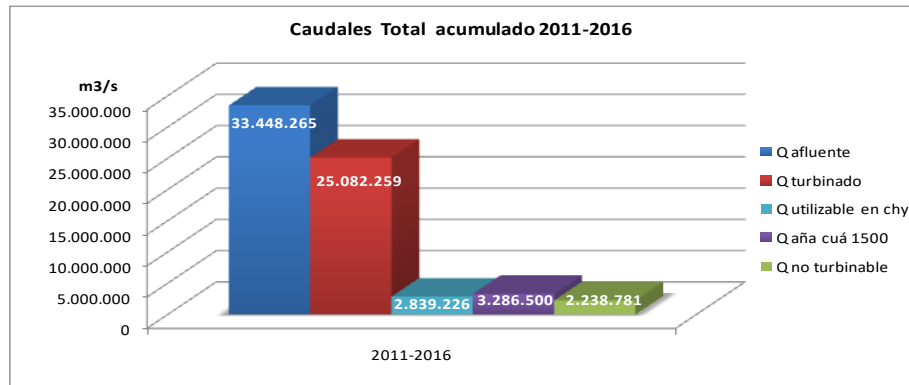


Figura 17: Resumen de Distribución de caudales teorizado 2011-2016

#### 4.2.2 Distribución del caudal afluente que podría haber sido aprovechado en el Complejo Yacyreta.

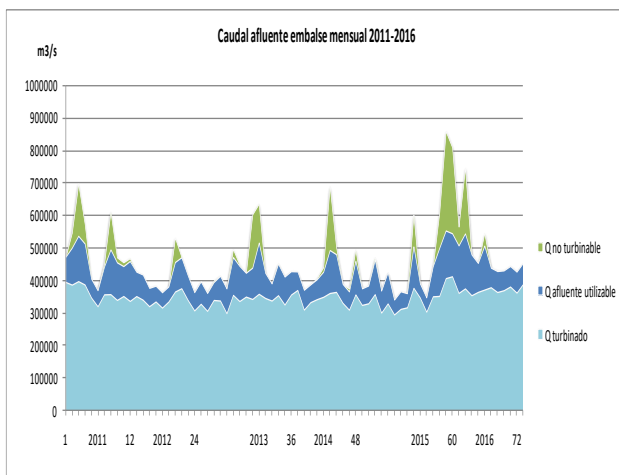


Fig. 18: Distribución del caudales utilizables anual

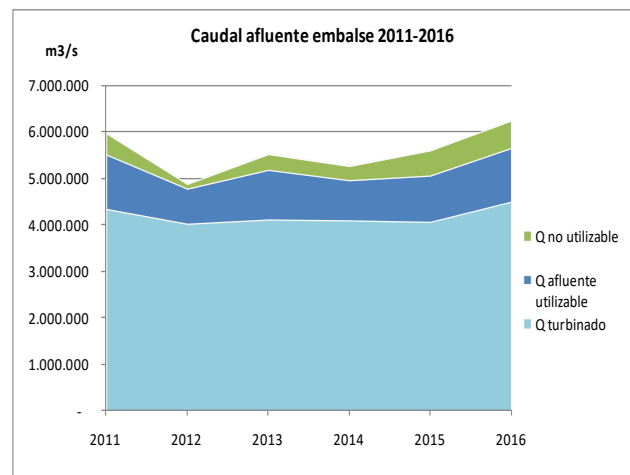


Fig. 19: Distribución de caudales utilizables periodo

En lo que respecta al caudal no utilizable el caudal obtenido de **2.238.781 m³/s** es **6,7%** del afluente, y para 1000 m³/s de descarga por Año cuá se obtuvo **2.478.150 m³/s**. que es **7,4%** del caudal afluente. Resultando una diferencia de **1,3 %** del afluente.

El caudal utilizable Total es igual a **31.209.484 m³/s**. que corresponde al **93,3%** del afluente, es 0,7 % mayor al 92,6% obtenido para la descarga de 1000 m³/s por Año Cuá que fue de **30.970.115 m³/s**. Este último cálculo nos da un mayor aprovechamiento de todo el caudal afluente al tener un menor vertido o caudal no turbinable.

Los resultados obtenidos exponen que la proporción de aprovechamiento con las dos condiciones es similar y presentan una abrumadora diferencia a la que se tiene en la condición real de funcionamiento de la CHY hasta la fecha.



**5.1.1 Tabla IV: Distribución de caudales calculados**

Caudales m <sup>3</sup> /s	2011-2016				
	1000 m <sup>3</sup> /s Aña Cuá		1500 m <sup>3</sup> /s Aña Cuá		
Q afluyente	33.448.265	%	33.448.265	%	diferencia
Q afluyente útil	30.970.115	92,6%	31.209.484	93,3%	0,7%
Q turbinado 20U	25.494.523	76,2%	25.082.259	75,0%	-1,2%
Q utilizable en CHY+3U	3.284.592	9,8%	2.839.226	8,5%	-1,3%
Q aña cuá	2.192.000	6,6%	3.286.500	9,8%	3,3%
Q no turbinable	2.478.150	7,4%	2.238.781	6,7%	-0,7%

**5.1.2 Tabla V: Aprovechamiento del afluyente en cada condición**

Caudales m <sup>3</sup> /s	2011-2016					
	Condición real CHY		Condición CHY repotenciada y Q=1000 m <sup>3</sup> /s Aña Cuá		Condición CHY repotenciada y Q=1500 m <sup>3</sup> /s Aña Cuá	
Q afluyente	33.448.265		33.448.265		33.448.265	
Q Total Turbinado	25.494.523	<b>76,2%</b>	30.970.115	<b>92,6%</b>	31.209.484	<b>93,3%</b>
Q turbinado CHY20U	25.494.523	<b>76,2%</b>	25.494.523	<b>76,2%</b>	25.082.259	<b>75,0%</b>
Q vertido	7.953.742	<b>23,8%</b>	2.478.150	<b>7,4%</b>	2.238.781	<b>6,7%</b>

**5.1.3 Tabla VI: Diferencia en % entre las condiciones calculadas y el real.**

2011-2016	Diferencia entre condición real CHY y Complejo repotenciado, Aña Cuá 1000	Diferencia entre condición real CHY y Complejo repotenciado, Aña Cuá 1500
<b>Q turbinado total</b>	<b>16,4% del afluyente</b>	<b>17,1% del afluyente</b>

El promedio de caudal utilizable en las dos condiciones es de **92,9%** y el turbinado real es de **76,2%** del afluyente, la diferencia es de **16,73%** del afluyente que corresponde a **5.595.277 m<sup>3</sup>/s**, equivalente a su vez a un **21,95%** de todo el **caudal Turbinado** real por la CHY en el periodo.

6.1.1 Gráficos de Resumen de las condiciones reales y teóricas en el periodo.

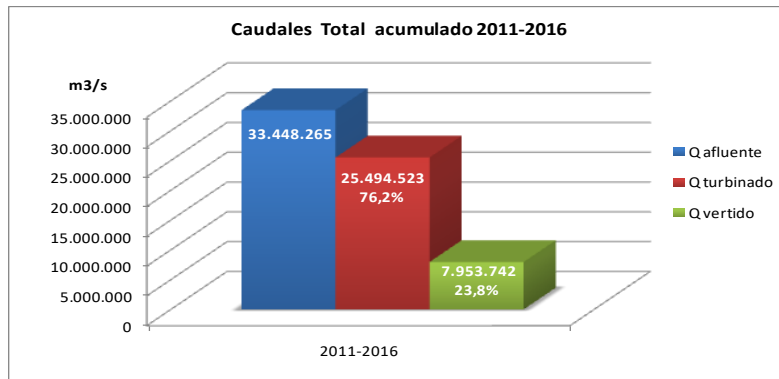


Fig.20: Condición real de funcionamiento de la CHY 2011- 2016

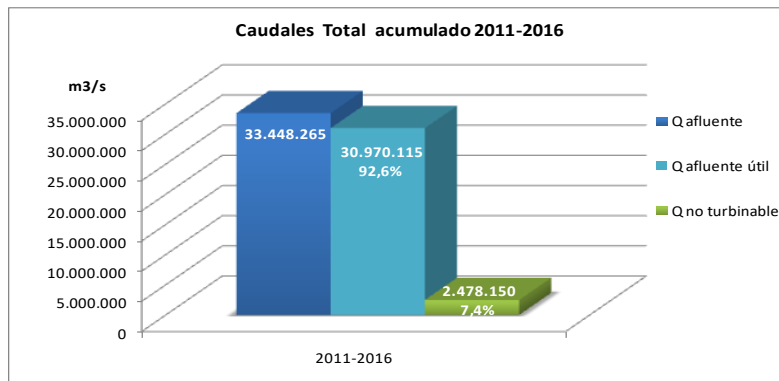


Fig.21: Condición de funcionamiento de la CHY repotenciada y Año Cuá 1000 m³/s

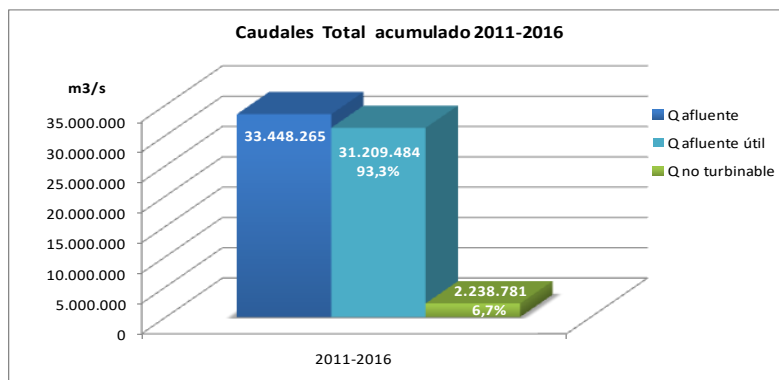


Fig.22: Condición de funcionamiento de la CHY repotenciada y Año Cuá 1500 m³/s

**7. Conclusión:** Los cálculos finales en la teorización elevan el aprovechamiento posible del caudal afluente hasta un **93%** en promedio del mismo, representando una sustancial diferencia respecto al **76%** del caudal afluente aprovechado en el periodo de 2011-2016 para la conversión en energía eléctrica a través de las unidades generadoras. Esa diferencia de **16,7%** a su vez es un **21,95%** de todo el caudal turbinado.

Los resultados de las estimaciones con las teorizaciones calculadas, con las dos condiciones límites de referencia, dan una muestra del potencial aprovechable del río Paraná, considerando que las fluctuaciones de caudales del río son cíclicas o similares a las presentes en el periodo de tiempo analizado.