



ACTUALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS HIDROLÓGICOS, POTENCIA Y ENERGÍA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO RÍO CHILI 1996-2015

INTRODUCCIÓN:

Energías del Río Chilí S.A.S. encomendó al ingeniero civil Carlos Saldarriaga Toro, la realización de la actualización de los estudios hidrológicos y de potencia y energía del proyecto Hidroeléctrico río Chili, el cual se encuentra localizado en el Municipio de Roncesvalles, al norte de la cabecera municipal, en los límites con el municipio de Rovira, la captación está localizada en la vereda Santa Elena. El proyecto consiste en la construcción y operación de una planta de generación de energía a filo de agua que aprovecha el recurso hídrico aportado por el río Chili para la generación hidroeléctrica de energía mediante un salto bruto de 1047,5 metros.

En el presente informe se presentan los resultados de la actualización hidrológica y de potencia y energía para el proyecto Chili.

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA

Para la actualización hidrológica se evaluaron los caudales mensuales y diarios en los últimos 20 años disponibles en el sitio de captación del proyecto Chili en el periodo: 1996-2015. Para el efecto, i) se efectuaron balances hídricos de largo plazo en la zona del proyecto y ii) para tener series mensuales y diarias en el sitio de captación (área drenada 240,82 km²), se trasladó información de caudales de la Estación hidrométrica del IDEAM 22047010 Hacienda El Queso sobre el río Amoyá (área drenada 1142,54 km²), aguas abajo del municipio de Chaparral, en el departamento del Tolima con alta correlación con régimen hidrológico del río Chili.

La estación hidrométrica El Queso cuenta con registros históricos de caudales diarios desde 1973 y ha sido la base para la realización de estudios similares en los proyectos Amoya actualmente en operación y el proyecto Ambeima en diseño. El caudal medio de la estación El Queso en el periodo 1973-2015 indica un valor de 49,20 m³/s; por otro lado, el caudal medio en el sitio de captación del proyecto Chili indica un valor de 6,7 m³/s, valor que resulta consistente con estudios anteriores bajo diferentes metodologías.

El caudal medio de 6,7 m³/s de sitio de captación del proyecto Chili, se validó mediante balances hídricos con información satelital en la zona de estudio, mediante el uso de álgebra de mapas digitales del terreno, e información de los

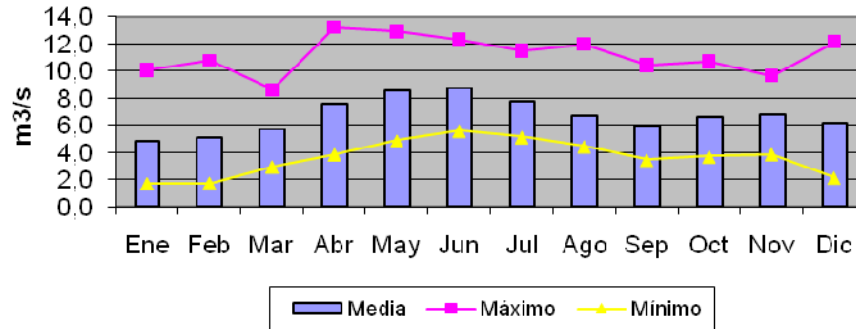
Respectivos campos de precipitación y evapotranspiración media anual en las cuencas de interés.

**Caudales mensuales en m³/s en el sitio de captación del proyecto río Chile
1996-2015**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
1996	4,0	5,1	6,0	6,5	9,7	8,4	9,6	6,0	5,6	6,5	5,1	5,6	6,5
1997	6,4	4,8	3,9	6,0	6,3	6,3	7,5	4,7	4,1	4,1	4,5	3,0	5,2
1998	2,2	2,9	3,9	8,2	8,0	9,8	9,2	6,2	5,7	7,4	6,7	6,5	6,4
1999	7,4	10,8	8,7	11,8	10,1	10,1	8,1	8,1	8,0	10,7	8,9	10,3	9,4
2000	6,3	7,3	6,9	7,8	12,9	10,5	7,6	8,0	9,0	8,5	8,8	5,3	8,3
2001	3,9	3,4	5,5	5,2	7,2	7,9	7,4	5,7	6,9	4,3	5,7	7,3	5,9
2002	3,2	2,4	4,7	6,5	7,6	12,3	8,1	7,9	5,8	6,6	6,5	4,9	6,4
2003	2,9	3,1	4,7	7,1	7,7	8,1	7,6	6,3	4,5	6,8	5,9	4,9	5,8
2004	4,0	3,0	2,9	5,9	9,4	8,1	7,3	6,6	5,1	6,5	7,4	5,7	6,0
2005	4,0	7,9	5,9	6,9	9,0	6,8	6,1	7,2	6,4	7,9	9,3	7,7	7,1
2006	7,4	5,7	6,8	8,9	8,7	11,3	8,7	7,0	6,7	6,6	9,4	7,5	7,9
2007	4,7	3,4	4,8	8,9	11,2	12,3	9,1	10,1	7,1	7,5	6,8	6,2	7,7
2008	5,4	7,8	7,9	7,8	11,0	9,9	11,5	12,0	10,4	10,4	6,8	12,2	9,4
2009	10,1	9,0	8,1	9,6	6,3	7,8	5,7	5,5	3,6	3,7	3,9	3,0	6,4
2010	1,7	1,7	3,9	9,1	8,3	7,6	9,6	5,4	7,1	5,7	9,2	8,5	6,5
2011	4,8	5,7	7,6	13,2	8,9	7,6	6,4	4,7	5,1	8,4	9,7	7,1	7,4
2012	8,2	6,2	5,4	7,6	8,3	6,7	6,2	6,2	4,4	5,9	4,8	4,1	6,2
2013	2,7	3,9	4,6	3,9	8,1	5,6	5,1	5,8	3,8	4,1	5,4	6,4	5,0
2014	3,9	3,1	6,2	6,0	7,1	8,7	7,9	5,4	6,0	6,1	5,7	5,0	5,9
2015	3,5	4,8	5,1	5,5	4,9	8,6	6,6	4,4	3,4	4,6	5,4	2,1	4,9
Prom	4,8	5,1	5,7	7,6	8,5	8,7	7,8	6,7	5,9	6,6	6,8	6,2	6,70
Máx	10,1	10,8	8,7	13,2	12,9	12,3	11,5	12,0	10,4	10,7	9,7	12,2	11,2
Mín	1,7	1,7	2,9	3,9	4,9	5,6	5,1	4,4	3,4	3,7	3,9	2,1	3,6

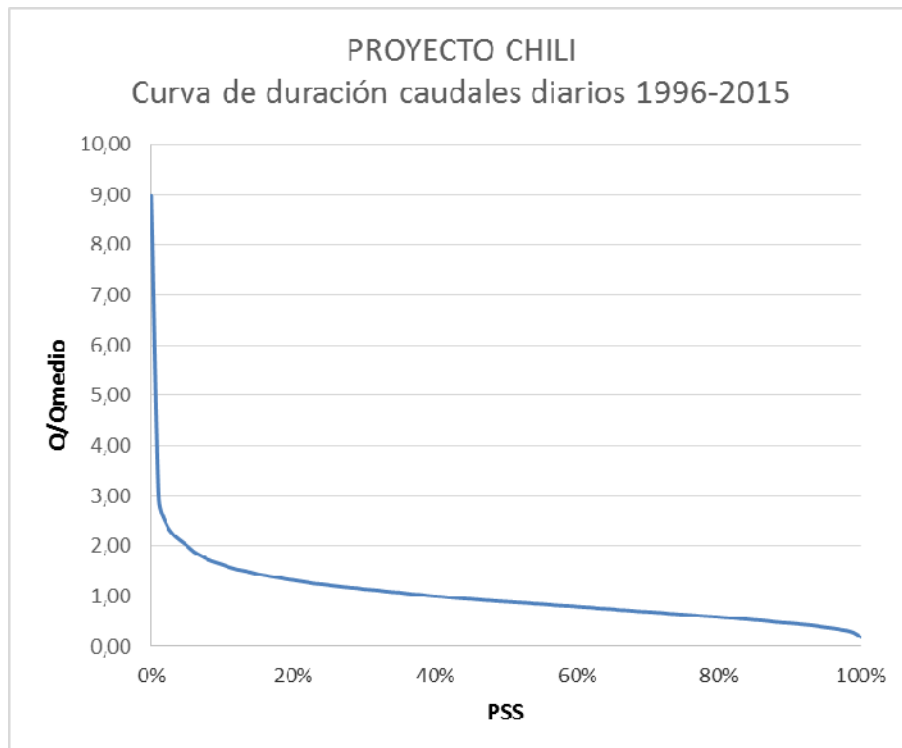
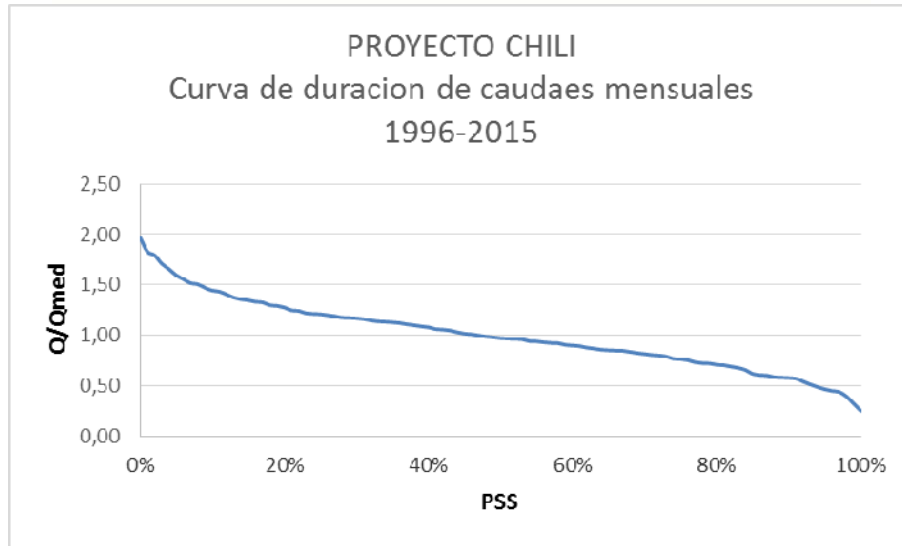
Caracterización del Régimen Hidrológico En general el proyecto Chile está sometido a un régimen hidrológico de tipo bimodal, caracterizado por dos periodos de verano: de diciembre a marzo y de agosto a septiembre; y dos periodos de lluvias de abril a julio y de uno más suave entre octubre y noviembre. Este comportamiento es típico en proyectos colombianos situados en la cordillera Central sometidos a variaciones del Frente Intertropical de Convergencia

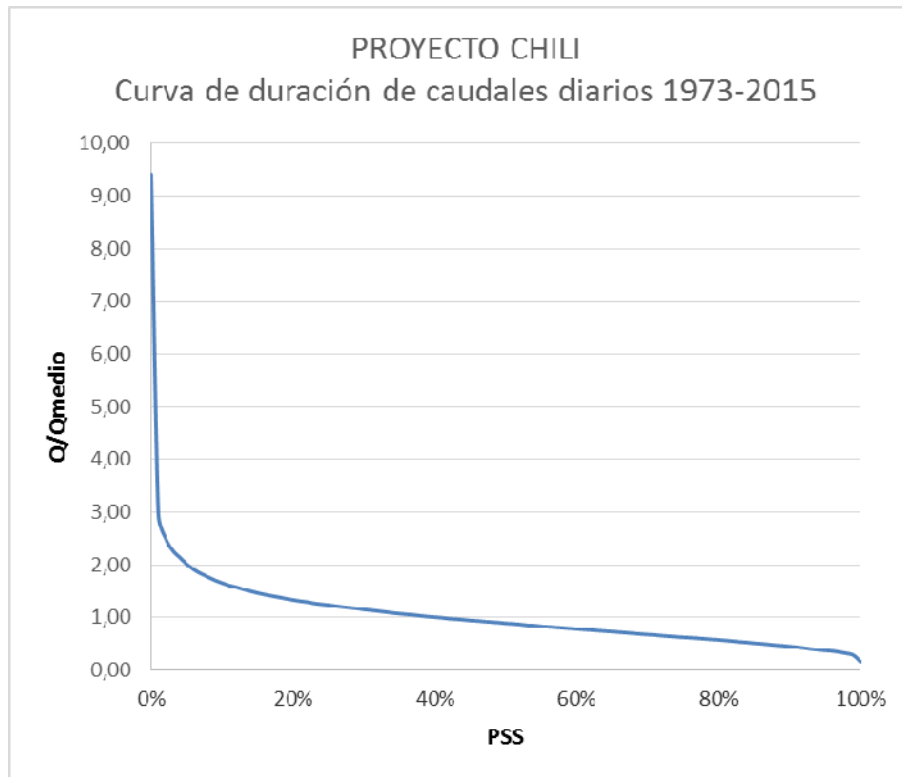
Proyecto Chili-Hidrología
Caudal medio=6,7 m³/s



Curvas de Duración de caudales mensuales y diarios Como es de esperar las curvas de duración de caudales diarios CDD, presentan valores extremos más acentuados que la curva de duración mensual CDM, para el mismo periodo. Lo cual implica que en la simulación de la producción energética los valores de energía media anual calculados a partir de series mensuales de caudales, son superiores a los obtenidos mediante series diarias de caudales para el mismo periodo.

Se resalta la alta similitud de las CDD para los periodos 1973- 2015 y 1996-2015





ESTUDIOS DE ENERGÍA Y POTENCIA

Estudio de producción de energía: Este estudio se centra en la capacidad de oferta energética máxima que el proyecto Chili puede generar entregar al Mercado de Energía. Por tanto, el proyecto se opera como una planta filo de agua aislada del sistema.

Modelo de simulación Energética:

- **Regla de operación** El modelo empleado para simular la producción de energía un proyecto hidroeléctrico Chili, tiene en cuenta que éste es un desarrollo a filo de agua, por tanto, su operación obedece a una regla típica que resulta de comparar en cada mes o día del periodo simulado los caudales aprovechable para energía de esa fuente hídrica, Q_p , con la capacidad de diseño de la conducción Q_d . Los caudales que exceden esta capacidad necesariamente son vertidos Q_v , el resto de este caudal va a la planta de generación Q_p .

- **Series de caudales aprovechables en el sitio de captación** Dado que existe un caudal ecológico (Q_e) el cual se adoptó en $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$, éste no puede



ser captado con fines de generación hidroeléctrica y debe dejarse fluir por el río, los caudales aprovechables para generación resultan de descontar al caudal total disponible ($Q_{río}$) en el sitio la restricción ambiental (Q_e). Se resalta que en cualquier circunstancia se debe satisfacer el requerimiento del caudal ecológico, de no ser posible se restituye al río $Q_{río}$.

Dependiendo del tipo de turbina se requiere un caudal mínimo Q_m , para que las máquinas puedan operar adecuadamente.

Por tanto, el caudal aprovechable por la planta (Q_p) para generación de energía resulta de satisfacer la lógica de las siguientes condiciones:

$$\text{SI } Q_{río} < (Q_e + Q_m)$$

$$\begin{aligned} Q_p &= 0 \\ Q_v &= 0 \\ Q_e &= Q_{río} \end{aligned}$$

$$\text{SI } Q_{río} \geq (Q_e + Q_m)$$

$$Q_p = \text{Mínimo valor } \{ Q_{\text{diseño}} ; (Q_{río} - Q_e) \}$$

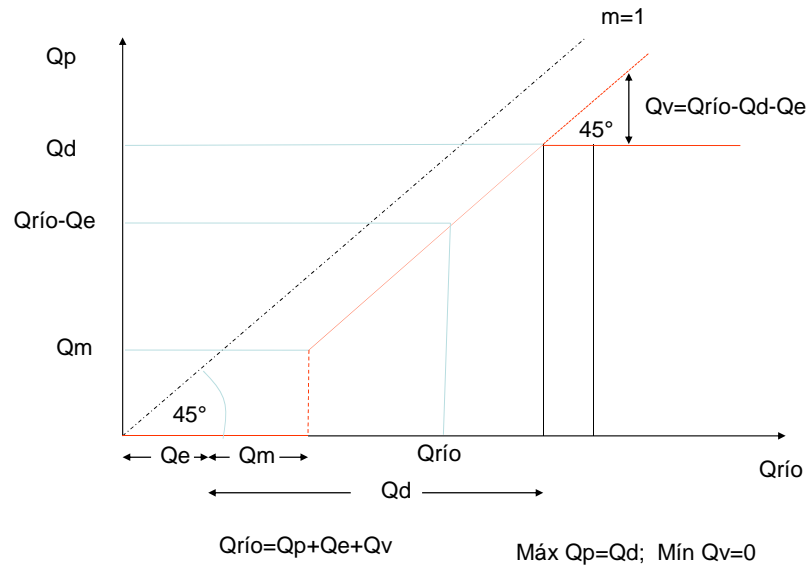
El caudal vertido (Q_v) mensual en la captación queda determinado así:

$$Q_v = \text{Máximo valor } \{ Q_{río} - (Q_{\text{diseño}} + Q_e) ; 0 \}$$

$$Q_e = Q_e$$



ENERGÍAS DEL RÍO CHILÍ



- Pérdidas hidráulicas en la conducción Para obtener las caídas hidráulicas netas en cada estado de la simulación se evaluó el coeficiente de pérdidas K para la totalidad de la conducción. $H_f = KQp^2$. El coeficiente de pérdidas hidráulicas K, incluye las pérdidas por: i) fricción a lo largo de las obras de conducción y ii) las singularidades locales a lo largo de la misma (entradas, salidas, codos y otros).

Se resalta, que las pérdidas hidráulicas de caída se calculan por mes o día para cada estado i de la simulación. La caída neta en cualquier estado será:

$$h_i = H_b - KQp_i^2$$

Qp_i = caudal medio aprovechable en el estado i

H_b = caída bruta, en el caso de el proyecto Chili es de 1045,0 m

K= coeficiente general de pérdidas hidráulicas calculado en 0,141

La caída media neta (\bar{H}) es el valor medio de los valores h_i , en todo el periodo (N) en número de años en la simulación

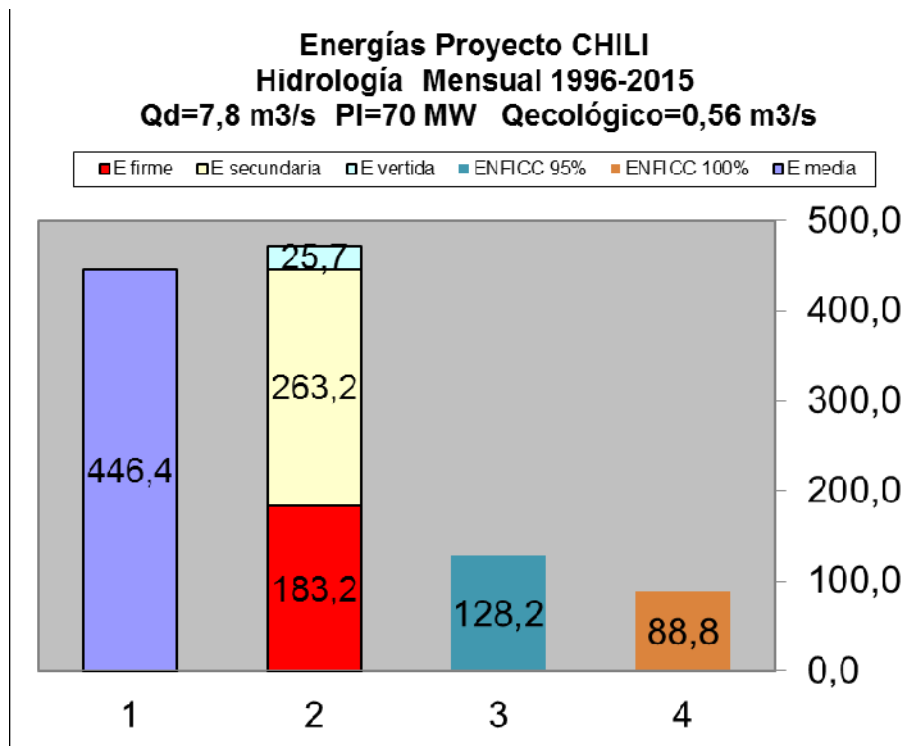
$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^N h_{ij}}{N}$$

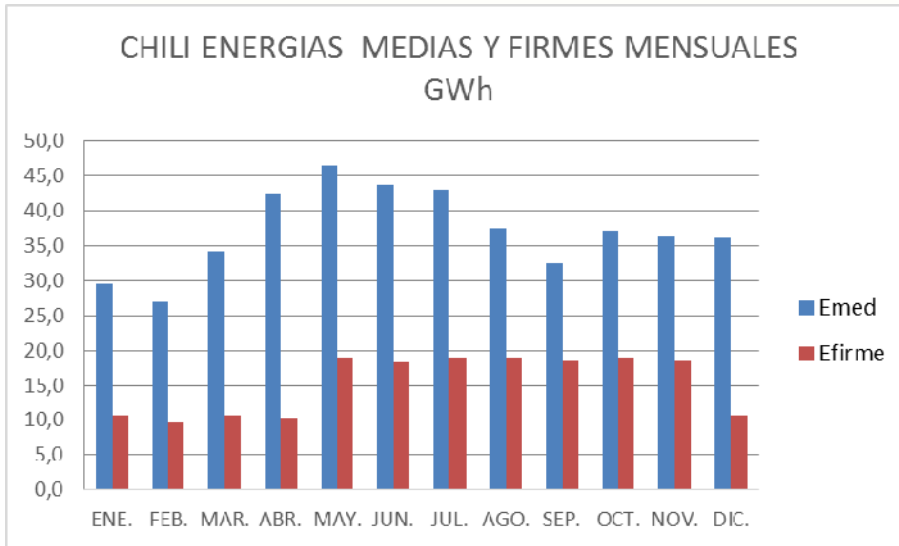
El valor medio de la generación anual se obtiene del promedio anual de generación en todo el periodo de simulación.

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^N E_{ij}}{N}$$

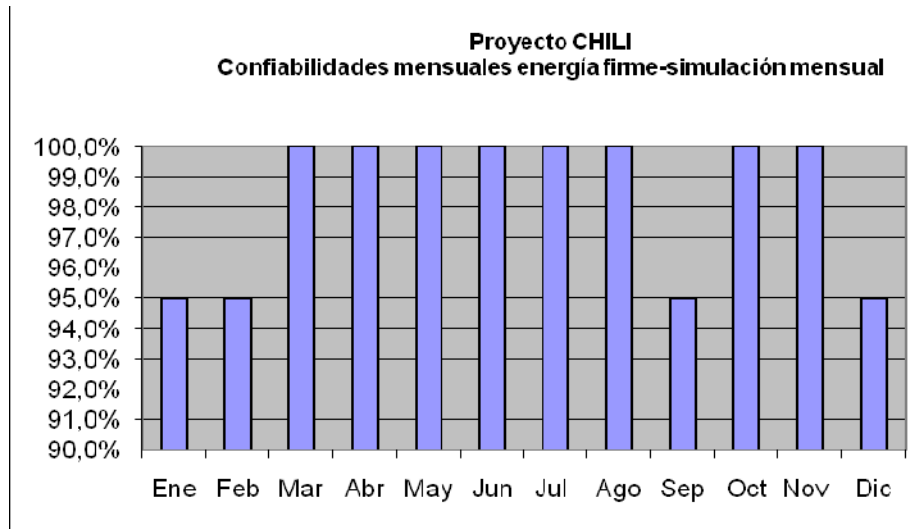
La energía firme corresponde a la máxima generación que produce la planta con un alto nivel de confiabilidad (95%) calculada sobre el mes crítico de verano.

La energía firme para el cálculo por confiabilidad ENFICC, corresponde a energía que firme que el Mercado Eléctrico Mayorista MEM reconoce al generador por el aporte de firmeza al sistema. El cálculo de ENFICC es más severo que el correspondiente a la energía firme ya indicada, dado que se basa en los valores de generación del mínimo mensual de cada año.





Confiabilidad mensual de la energía firme:



Producción energética proyecto CHILI 70 MW- simulación mensual

Año	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1996	22,9	27,7	36,7	38,4	49,3	47,7	49,3	34,4	30,9	37,7	27,8	33,6	436,3
1997	39,2	25,8	22,1	35,2	36,5	35,2	44,0	26,6	22,0	22,8	24,5	16,4	350,2
1998	11,1	14,2	22,2	49,0	47,1	47,7	49,3	35,7	31,8	43,3	37,7	39,7	428,8
1999	45,9	46,8	51,9	50,2	49,3	47,7	47,9	48,0	45,5	49,3	47,7	51,9	581,9
2000	38,3	40,5	42,4	46,7	49,3	47,7	44,7	46,8	47,7	49,3	47,7	32,0	533,1
2001	22,4	17,3	33,2	30,3	42,1	44,8	43,0	32,6	39,1	23,6	31,3	44,9	404,5
2002	17,7	11,0	27,7	38,2	44,3	47,7	47,4	46,2	32,0	38,1	36,2	29,1	415,8
2003	16,0	15,5	27,6	42,1	45,3	45,8	44,7	36,1	24,4	39,8	32,7	29,1	399,1
2004	23,2	15,0	15,9	34,3	49,3	46,2	42,6	38,0	27,9	37,5	41,7	34,4	406,1
2005	23,3	44,0	35,9	40,7	49,3	38,1	35,2	42,0	36,1	46,2	47,7	47,3	485,7
2006	45,7	30,9	41,4	50,2	49,3	47,7	49,3	40,9	37,5	38,3	47,7	46,4	525,1
2007	28,0	16,9	28,7	50,2	49,3	47,7	49,3	49,3	39,9	43,7	38,2	37,5	478,6
2008	32,1	43,3	48,9	46,6	49,3	47,7	49,3	49,3	47,7	49,3	38,2	51,9	553,5
2009	51,9	46,8	50,4	50,2	36,4	44,5	32,8	31,2	18,8	20,0	20,4	16,5	419,8
2010	7,6	7,1	22,5	50,2	49,1	43,1	49,3	30,5	40,2	32,5	47,7	51,9	431,5
2011	28,4	30,9	47,1	50,2	49,3	43,1	37,3	26,5	28,1	49,3	47,7	43,3	481,1
2012	50,9	34,0	32,5	45,1	49,1	37,5	36,0	35,7	23,6	33,6	26,3	23,6	427,9
2013	50,9	34,0	32,5	45,1	49,1	37,5	36,0	35,7	23,6	33,6	26,3	23,6	427,9
2014	14,5	20,2	27,2	21,4	47,8	31,0	29,1	33,2	19,9	22,2	29,6	39,3	335,4
2015	22,4	15,6	37,6	35,4	41,4	47,7	46,1	30,7	33,4	34,9	31,6	29,9	406,7
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
GWh/año	29,6	26,9	34,2	42,5	46,6	43,8	43,1	37,5	32,5	37,2	36,4	36,1	446,4
Máx GWh/año	51,9	46,8	51,9	50,2	49,3	47,7	49,3	49,3	47,7	49,3	47,7	51,9	581,9
Mín GWh/año	7,6	7,1	15,9	21,4	36,4	31,0	29,1	26,5	18,8	20,0	20,4	16,4	335,4

Características del proyecto CHILI-simulación mensual:

Potencia instalada MW	70
Caudal diseño m3/s	7,8
Caudal aprovechable m3/s	5,9
Caudal regulado m3/s	2,5
Caudal Ecológico m3/s	0,56
H bruta m	1045,0
H neta m	1036,45
Energía media GWh/año	446,4
Energía firme GWh/año	183,2
ENFICC BASE (100%) GWh/año	88,8
ENFICC (95%) GWh/año	128,2
Probabilidad vertidos %	21,3
FP	0,73

Simulación diaria del proyecto Chili: La simulación diarias refleja aspectos que no se captan en le simulación mensual. En este caso, la simulación diaria se realizó sobre una serie de 7300 días del periodo 1996-2015

Potencia instalada MW	70
Caudal diseño m3/s	7,8
Caudal aprovechable m3/s	5,4
Caudal Ecológico m3/s	0,56
H bruta m	1045,0
H neta m	1036,45
Energía media GWh/año	413,5
FP	0,67

Como se observa la simulación diaria presenta un valor de 413,5 GWh/año, esto un de 7% menos respecto al obtenido con simulación mensual de 446,4 GWh/año.

Curva de Carga del proyecto CHILI con simulación diaria, indica que la planta operaria el 24% del tiempo a plena carga de 70 MW

