

## FORMULARIO DE INSCRIPCIÓN, PRESENTACIÓN DE RESUMEN Y TRABAJO COMPLETO

Universidad:	Universidad del Nacional del Este
Facultad/Centro/Instituto:	Politécnica
Autor/es:	Natalia Lujan González López; José Osmar Escobar López; Luis Barrientos (tutor)
Título do trabajo:	Cálculo de Energía Firme y Energía Asegurada de la Central Acaray por simulación Computacional.
Núcleo Disciplinario / Comité Académico / Comisión Permanente:	Energía
Correo electrónico:	osmar_esc@hotmail.com <sup>1</sup> ; nathylujan@gmail.com <sup>2</sup>
Palabras claves:	Energía Firme, Energía Asegurada, Simulación computacional
¿Tiene interés en hacer presentación oral de su trabajo? ( x )SI ( )NO	
*Esta preferencia está sujeta a alteración en función de la disponibilidad.	

### Introducción

Este trabajo presenta un modelo de simulación para el cálculo de energía firme y energía asegurada, representando detalladamente los principales aspectos que envuelven la operación de la central hidroeléctrica de Acaray, en el planeamiento de la operación se evalúa la seguridad de atendimento de la demanda teniendo en cuenta que la Energía Asegurada es el valor máximo que la empresa generadora puede comprometerse a entregar en un periodo de tiempo dado.

Este trabajo fue realizado teniendo en cuenta el histórico de caudales afluentes configurando diversos escenarios hidrológicos del Rio Acaray; La finalidad de la misma es predecir la Energía Firme y la Energía Asegurada de la central Hidroeléctrica Acaray ubicada sobre la supercarretera de Itaipu, en Hernandarias. El valor de la energía firme y de la energía asegurada se obtiene mediante la simulación de la operación de la central con un algoritmo que buscará atender una determinada demanda, usando los caudales afluentes del histórico y el agua acumulado en el embalse. La Energía Firme bajo un criterio determinístico resulta de la simulación en que todos los escenarios muestran cien por ciento de atendimento de la demanda. La Energía Asegurada a diferencia resulta de la simulación con una probabilidad de no atendimento de la demanda.

La energía asegurada se calcula de acuerdo a un modelo probabilístico pudiendo estadístico basado

en la energía firme y los flujos de agua de los ríos, además de los niveles del embalse de la central dentro de la fase de estudio de la misma.

### 1. Conceptos Fundamentales

#### 1.1. Central Hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es la que aprovecha la energía hidráulica para producir energía eléctrica. Si se concentra grandes cantidades de agua en un embalse, se obtiene inicialmente energía potencial, la que por la acción de la gravedad adquiere una energía cinética o de movimiento, pasa de un nivel superior a otro más, a través de las obras de conducción (la energía desarrollada por el agua al caer se le conoce como energía hidráulica), por su masa y velocidad, el agua produce un empuje que se aplica a las turbinas, las cuales transforman la energía hidráulica en energía mecánica.

Esta energía se propaga a los generadores que se encuentran acoplados a las turbinas, los que la transforman en energía eléctrica, la cual pasa a la subestación continua o cerca de la planta. La subestación eleva la tensión o voltaje para que la energía llegue a los centros de consumo con la debida calidad.

Como sabemos, el caudal de un río es variable en las diferentes estaciones del año; además; en muchos casos, hay que contar con años de sequía y años de abundancia de agua.

La labor de una central hidroeléctrica es convertir en electricidad la energía potencial liberada por la caída de una corriente de agua. Pueden clasificarse

en Centrales de Acumulación, de Paso y/o de bombeo.

## 1.2. Funcionamiento.

La industria hidroeléctrica para su funcionamiento demanda de un aporte masivo de agua, si bien el agua que se utiliza (caudales afluentes) retornan íntegramente a las masas de agua tras su uso. La central consigue aprovechar la energía contenida en una masa de agua ubicada a una cierta altura, transformándola en energía eléctrica. Esto se logra conduciendo el agua desde el nivel en el que se encuentra, hasta un nivel inferior en el que se sitúan una o varias turbinas hidráulicas que son accionadas por el agua y que a su vez hacen girar uno o varios generadores produciendo energía eléctrica.

Los embalses se clasifican, de acuerdo a su capacidad de regulación, en embalses de acumulación y embalses de compensación. Los embalses de acumulación poseen una gran capacidad de almacenamiento, por lo que son los responsables directos de la regulación del caudal de los ríos. Sin embargo, los embalses de compensación poseen una pequeña capacidad de almacenamiento, lo que les permite regular solo las pequeñas descargas. Las Centrales Hidroeléctricas, cuyos embalses no poseen ninguna capacidad de almacenamiento del agua, son conocidas como Centrales de Paso o a pelo de agua [1].

Las Centrales Hidroeléctricas con embalses de regulación acumulan agua en los periodos lluviosos para utilizarlos en los periodos secos. Aquellas centrales con poca capacidad de regulación, acumulan el agua los fines de semana y en los días feriados para utilizarlo en los días útiles. Las centrales que tienen una regulación diaria, acumulan el agua durante el día para utilizarlo en las horas de mayor consumo de energía eléctrica [3].

Considerando el uso del volumen del embalse, el mismo se puede clasificar en tres tipos: volumen útil, volumen de seguridad y volumen muerto.

La Figura 2 muestra una descripción gráfica de la clasificación del volumen total del embalse.

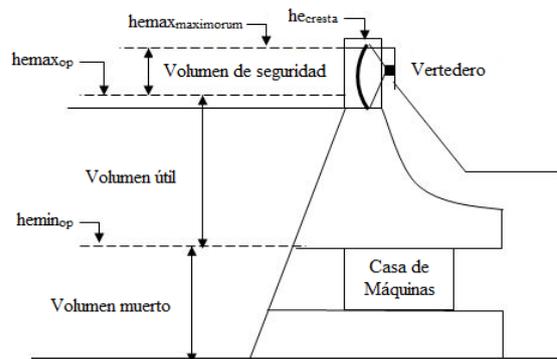


Figura 2: Clasificación del volumen total del embalse (Cigogna, 1.999).

## 1.3. Embalse

La cota de embalse es el nivel del agua acumulada en el mismo en relación al nivel del mar, según los volúmenes extremos del embalse se definen las cotas críticas: cota máxima normal operativa  $Z_{MAXno}$  es la cota que posee el embalse con su volumen máximo  $X_{MAX}$ , la cota mínima normal operativa  $Z_{MINno}$ , es la cota mínima del embalse con la cual consigue entrar agua a la toma de agua. A partir de aquí se define el volumen muerto como el volumen almacenado por debajo de la cota mínima y es considerado así pues no puede ser aprovechado para la generación eléctrica, el volumen almacenado entre las cotas  $Z_{MAXno}$  y  $Z_{MINno}$ .

La  $Z_{MINno}$  es de vital importancia debido al peligro de la formación de vórtices en la toma de agua lo cual colabora con la aparición del fenómeno de cavitación que en pocas palabras son pequeñas burbujas de aire que implosionan por las paletas de la turbina debido a la gran presión liberando energía suficiente como para crear grietas microscópicas que contribuirán a disminuir la vida útil de la misma. La  $Z_{MAXno}$  es de importancia pues por encima de esta habrá peligro de colapso de la central, debido a esto se define una cota máxima maximorum, que

sobrepasa a la máxima en un valor llamado de seguridad.

#### 1.4. Cota del Embalse

La cota del embalse es una función no lineal del volumen de agua almacenado en el embalse de la Central Hidroeléctrica, es decir,  $h_e = f(X)$ .

Donde

$h_e$  Cota o altura del nivel del embalse

$X$  Volumén del embalse

Representaremos al nivel del embalse por un polinomio de cuarto grado.

$$h_e(X) = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 + a_4 \cdot X^4 \quad (1)$$

Donde  $a_0, a_1, a_2, a_3$  y  $a_4$  son los coeficientes del polinomio.

el polinomio cota volumen de la Central de Acaray

#### 1.5. Cota Canal de Fuga

El canal de fuga es la estructura que vuelve a encaminar el agua en el río luego de pasar por las turbinas.

El nivel del canal de fuga es representado por un polinomio de cuarto orden.

$$h_{cf}(u) = a_0 + a_1 \cdot u + a_2 \cdot u^2 + a_3 \cdot u^3 + a_4 \cdot u^4 \quad (2)$$

Donde  $a_0, a_1, a_2, a_3$  y  $a_4$  son los coeficientes del polinomio.

#### 1.6. Ecuación Dinámica del Agua

La ecuación dinámica que determina la evolución en el tiempo del volumen de agua almacenada en el embalse satisface al principio de conservación de masa.

Este principio es traducido en la siguiente ecuación

$$X^{n+1} = X^n + y^n - u^n \quad (3)$$

$n$  índice de intervalo de tiempo;

$X^{n+1}$  volumén de agua almacenada al inicio del intervalo  $n + 1$ ;

$X^n$  volumén almacenado en el embalse;

$y^n$  afluencia natural;

$u$  defluente;

$u = q - v$ ;

$q^n$  volumen de caudal turbinado;

$v^n$  volumen del vertido durante el intervalo;

#### 1.7. Modelado de la Función de Producción

La energía eléctrica es el resultado de un proceso de transformación y está dada por la expresión matemática:

$$p = g \times \rho \times \Delta t \times \eta_t \times \eta_g \times h_l \times q \times 10^{-3} [\text{Joules}] \quad (3.1)$$

Dónde:

$p$  es la potencia generada en la máquina, en [MW].

$g$  es la aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$ .

$\rho$  es el peso específico del agua, en  $[kg/m^3]$ .

$\Delta t$ : Periodo de tiempo considerado [s]

$\eta_t$  es rendimiento de la turbina, en [%].

$\eta_g$  es rendimiento del generador, en [%].

$h_l$  es la altura del salto líquido, en [m].

$q$  es el caudal turbinado, en  $[m^3/s]$ .

Como la potencia es igual a la energía producida por unidad de tiempo ( $P = dE/dt$ ), la potencia de salida de la unidad generadora se define como:

$$P = \rho \cdot g \cdot h_l \cdot q \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad [\text{Watts}] \quad (4)$$

Esta ecuación nos da la potencia en watts, considerando que  $h_l$  se mide en metros y  $q$  en metros cúbicos por segundo, además que  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  y  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Los rendimientos de la turbina  $\eta_t$  y  $\eta_g$  del generador se miden en %, es decir, son adimensionales.

Luego, expresando la potencia en MW, se obtiene la ecuación:

$$P = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot h_l \cdot q \quad [\text{MW}] \quad (5)$$

En resumen, la potencia que produce una unidad generadora depende principalmente del caudal turbinado  $q$  y de la altura de la caída del agua  $h_l$ . Además, es dependiente del rendimiento del conjunto turbina-generador. Todos estos parámetros son responsables de la no linealidad de la función de producción que está dada por la ecuación que sigue:

$$P = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot h_l \cdot q \quad [\text{MW}] \quad (6)$$

## 1.8. Factor de productividad [FP]

El valor del Factor de Productividad está expresada en la función  $FP = f(h_b)$ , donde se indica que depende de la altura de salto bruto disponible, que genera una potencia medida en Megawatts, utilizando un caudal turbinado en metros cúbicos por segundo.

$$FP = a \cdot h_b \text{ [MW/(m}^3\text{/s)]} \quad (7)$$

Dónde:

$h_b$ : Altura de salto bruto en metros.

$a$ : Constante.

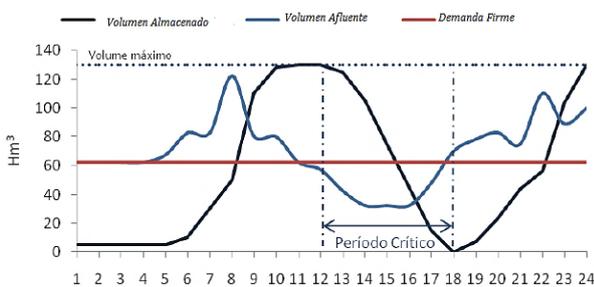
El comportamiento de esta variable está expresado en la función  $h_b = f(h_e, h_{cfs})$ , donde se observa que su valor es dependiente de los niveles aguas arriba y aguas abajo de la Central Hidroeléctrica Itaipu, respectivamente.

$$h_b = h_e - h_{cf} \text{ [m]} \quad (8)$$

## 4. Energía Firme y Energía Asegurada

### 4.1. Periodo Crítico

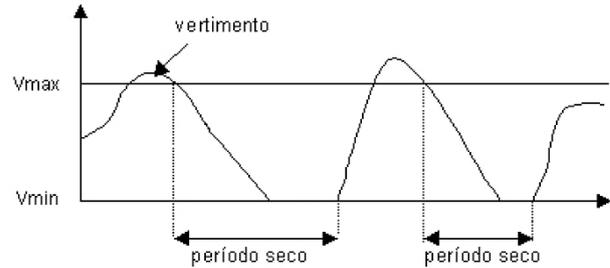
El periodo crítico para las centrales hidroeléctricas se considera como el periodo más seco, el periodo donde ocurren las peores afluencias del histórico de ahí el calificativo de "crítico", en dicho periodo el riesgo de déficit aumenta considerablemente. El periodo crítico depende de la aleatoriedad hidrológica y es el periodo en el cual la central presente el menor almacenamiento de agua observado en el registro histórico sin llenado intermedio.



**Figura 1:** Periodo Crítico en una Central Hidroeléctrica (Cigogna, 1.999).

El periodo seco es similar al periodo crítico del sistema, es el intervalo de tiempo que va de lleno a vacío, sin llenado intermedio. La diferencia es que en una simulación probabilística se presentan varios

periodos secos como se puede apreciar en la figura 2.



**Figura 2:** Periodos Secos de una Simulación Probabilística (Cigogna, 1.999).

Para el caso de la energía firme suponemos que no existe otro periodo crítico, existe un único periodo crítico y corresponde al intervalo en que el nivel del embalse va de lleno a vacío, (caso determinístico); sin embargo en el caso probabilístico de los años simulados ocurren varios periodos secos o críticos.

### 4.2. Energía Firme

- La Energía Firme tiene varias aplicaciones:
- Como criterio de expansión del parque generador;
- Como certificado de garantía para los contratos de compra-venta de energía entre empresas.

Por definición, la misma asegura el atendimento de la demanda aun en las peores condiciones hidrológicas registradas. Es un criterio determinístico, porque asegura el atendimento de la demanda en un 100%, bajo la premisa que no existe otra serie histórica a simular peor que la serie histórica obtenida en el registro [2].

La posibilidad de un ocasional déficit o el atendimento con una probabilidad inferior al 100%, se denomina criterio probabilístico.

### 4.3. Energía Asegurada

La energía asegurada es la máxima producción de energía que puede ser mantenida por las centrales hidroeléctricas casi continuamente en un periodo de largo plazo, simuladas a partir de las innúmeras posibilidades de caudales naturales en sus periodos críticos admitiendo un riesgo de no



simulación para verificar que parámetros influyen en el desempeño energético de la central.

Conforme ya mencionada para simular el comportamiento de la central hidroeléctrica Acaray inicialmente se ingresan los datos de entrada y se establecen los límites operativos de la misma.

A continuación se mencionan algunos de ellos:

Histórico de caudales afluentes en el tiempo determinado a simular la operación.

Polinomio Nivel x Volumen del embalse de la Central Hidroeléctrica Acaray.

Polinomio Nivel x Defluencia de la Central Hidroeléctrica Acaray.

Factor de Productividad x Altura de Salto Bruto de la Central Hidroeléctrica Acaray.

Límites del volumen del embalse (o nivel de embalse) de la Central Hidroeléctrica Acaray.

Límites del caudal turbinado máximo de la Central Hidroeléctrica Acaray.

Límites de la potencia máxima generada por la Central Hidroeléctrica Acaray.

Unidades generadoras disponibles de la Central Hidroeléctrica Acaray.

Valor inicial estimado de energía firme para la Central Hidroeléctrica Acaray.

Algunos de los parámetros de la central fueron estimados, algunos son catalogados de forma directa como variables de decisión y otros son calculados indirectamente a partir de los valores de otros parámetros.

Pasos para cálculo de energía firme

**Paso 1:** Se estima un valor inicial de energía firme.

**Paso 2:** Con la ecuación dinámica del agua se calcula el valor del volumen del embalse para los siguientes periodos;

**Paso 3:** Se verifica que el volumen del embalse en el periodo o mes siguiente se encuentre entre el volumen máximo y el mínimo entonces:

Si el volumen del embalse en ese periodo es mayor al volumen máximo de la presa  $X_{n+1} > X_{max}$ ; se descarga agua por el vertedero;

El caudal vertido será  $v = \frac{X_{n+1} - X_n}{factor}$  [ $m^3/s$ ] y el volumen en ese periodo el máximo  $X_{n+1} = X_{max}$ . Si en ese periodo el volumen del embalse es menor que el mínimo  $X_{n+1} < X_{min}$ ; Se disminuye el caudal turbinado en  $q_{n+1} = q_n - \frac{X_{n+1} - X_n}{factor}$  y el volumen en ese periodo queda en el mínimo  $X_{n+1} = X_{min}$ ;

**Paso 4:** Luego se determinan para cada periodo:  $h(X_n)$ ; Cota del embalse en función del volumen en  $Hm^3$

$h_b = h(X) - h_{cf}$ ; Altura bruta

$Fp_n(H_b)$ ; el factor de productividad en función a la altura bruta

$P_n = q_n \times Fp_n$ ; Potencia generada por la central.

**Paso 5:** Con la potencia calculada se verifica la condición  $|P_n - ef| \leq \epsilon$ . Si no se cumple se incrementa el valor del caudal turbinado del mes considerado en:  $q_n = q_n + \alpha \cdot (ef - P_n)$  y se vuelven a calcular los parámetros anteriores hasta que se cumpla la condición (1)

Si se cumple entonces se tienen los valores de potencia y caudal correctos que son  $P_g = P$ ,  $q = q_n$

**Paso 6:** Luego se grafica la energía firme y el volumen del embalse en el periodo considerado.

“El valor de energía firme correcto es el que hace que el volumen del embalse llegue al mínimo considerando el periodo crítico”

### Algoritmo de simulación elaborado para el cálculo de Energía Asegurada

Esta energía a diferencia de la firme posee un porcentaje de aceptación de déficit. Este porcentaje de déficit aceptado por la norma actual del sector eléctrico es del  $\pm 5\%$  es decir la misma posee un 95% de probabilidad de atendimento (que ocurra) y 5% de probabilidad de no atendimento (no ocurra).

Se muestra a seguir el procedimiento adoptado para el cálculo de energía firme:

**Paso 1:** Se Adopta un valor de demanda asegurada inicial EA.

**Paso 2:** Se simula la operación del sistema buscando atender esa demanda continuamente.

Se contabilizan el porcentaje x% de los años simulados en los que hubo registro de falla en el atendimento; si x% es inferior al criterio de riesgo considerado 5% se aumentara la demanda de energía asegurada adoptado inicialmente y se vuelve al paso II.

Si x% es superior al criterio de riesgo, se reduce el valor de EA adoptado inicialmente y se vuelve al paso 2

**Paso 3:** Si x% es igual al criterio de riesgo o se encuentra dentro de los límites  $\pm 5\%$ , es el valor de Energía Asegurada.

## Resultados

Las figuras 1 y figura 2 muestran los resultados de las simulaciones para el cálculo de las Energía Firme y Asegurada, a través del simulador con interfaz gráfico, facilitándolo interacción entre el simulador y el usuario.

De acuerdo a la serie de los años 1937-2007 de caudales del rio Acaray se observa en la tabla I que en los años 1967 y 1977 ocurre que hay poca agua disponible para ser turbinada lo que nos indica que dentro de esos 10 años hubo registro de baja afluencia, hallándose con el periodo crítico de la serie estudiada, es decir, volumen del embalse se encontró en mínimo operativo.

De acuerdo a las simulaciones realizadas se puede considerar entonces una energía firme de 51,29MW-med y energía asegurada de 52,6MW-med para los años de estudio.

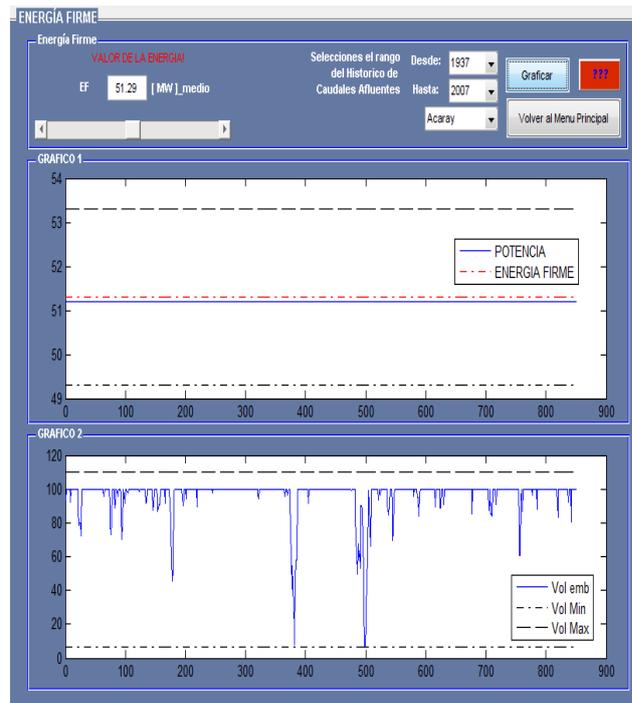


Figura 1: Vista del Simulador Calculo de Energía Firme.

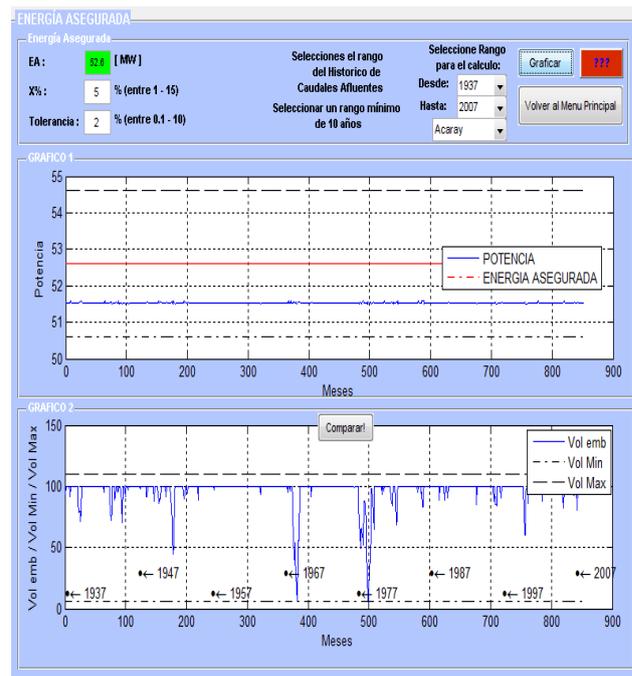


Figura 2: Vista del Simulador Calculo de Energía Asegurada.

Tabla I: Resultados Obtenidos

Tiempo Simulado [Años]	Periodo Critico [Años]	Energía Firme [MW-med]	Energía Asegurada [MW-med]
1937 - 2007	1967- 1977	51,29	52,6

## Conclusiones

En el trabajo realizado se ha creado un programa computacional que simula la operación de la central hidroeléctrica Acaray y realiza el cálculo de energía firme y energía asegurada de dicha central hidroeléctrica.

La energía firme de la central hidroeléctrica Acaray es de 51,29 MWmed, esto se obtiene considerando el histórico de caudal afluente desde el año 1937 al 2007.

En cuanto a la energía asegurada, el simulador nos da como resultado 52,6 MWmed, con esto se puede afirmar que la energía eléctrica que la central podrá garantizar es de 52,6 MWmed.

<sup>1</sup> Cigogna, M.A.; Modelo de Planejamento de Operação Energetica de Sistemas Hidrotérmicos a Centrais Individualizadas Orientada por Objetos. Campinas, 1.999

<sup>2</sup> García, R.; Simulación de la Operación Hidroenergética y Cálculo de la Energía Firme, 2.006.

<sup>3</sup> Centrais Hidroeléctricas. Disponible en línea: <http://www.olade.org/sites/default/files/06%20SESSION%2006%20C%2011%20CENTRALES%20HIDROELECTICAS%20Ar>. Acceso el 15 de octubre de 2015

<sup>4</sup> Santos, R.; Ferramenta para Avaliação da Energia Firme Baseada em Técnica de Pontos Interiores, BRASIL, 2008

<sup>5</sup> Cadernos Temáticos ANEEL 3 – Energia Assegurada. Disponible en: <http://www.abceonline.com.br/XXsimposiojuridico/palestras/29PalestraABCE-revisaogarantiasfisicas-29102014FINAL.pdf> Acceso el 04 de agosto de. 2015