



## **Cálculo de la Energía Firme y Energía Asegurada de la Central Acaray por simulación computacional**

**José Escobar<sup>1</sup>, Natalia González<sup>2</sup>, Luis Barrientos<sup>3</sup>**

**Facultad Politécnica. Universidad Nacional del Este<sup>1,2,3</sup>**  
osmar\_esc@hotmail.com<sup>1</sup>, nathylujan@gmail.com<sup>2</sup>, lgbm\_@hotmail.com<sup>3</sup>

**Ciudad del Este – Paraguay<sup>1,2,3</sup>**

### **RESUMEN**

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 llevando 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.

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 resulta de la simulación en que todos los escenarios muestran cien por ciento de atendimento de la edmanda. La Energía Asegurada resulta de la simulación con una probabilidad de no atendimento de la demanda.

### **PALABRAS CLAVES**

1. Energía Firme, 2. Energía Asegurada, 3. Simulación computacional, 4. Central Hidroeléctrica Acaray.



## 1 INTRODUCCION

El planteamiento adecuado de la operación de la central hidroeléctrica Acaray es trascendental ya que el producto final de la misma “la energía eléctrica”, es vital para el crecimiento del país. Es importante que esta labor sea hecha de manera eficiente garantizando el correcto atendimento de la demanda. La planificación demanda modelar escenarios energéticos de forma a garantizar el suministro y la calidad de la energía. El estudio se basará en balances integrales sobre la manera en que se consume, convierte y produce energía, considerando una gama de escenarios alternativos basado en el registro histórico de caudales naturales.

Es imprescindible realizar los planeamientos de operación ya que en términos de energía todas las decisiones tomadas dentro de la misma condicionan la competitividad y confiabilidad de las Centrales, además de aportar elementos que encaminen hacia estrategias a la hora de enfrentarse con los retos energéticos, económicos y ambientales.

## 2 EMBALSES

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].

La Figura 2.1 muestra una descripción gráfica de la clasificación del volumen total del embalse.

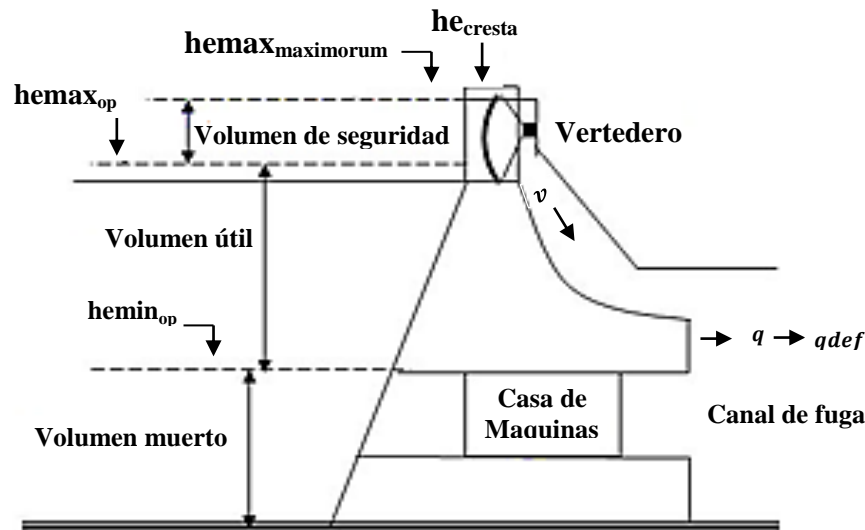


Figura 2.1: Clasificación del volumen total del embalse [1].

### 2.1 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.

$$h_{cf}(u) = a_0 + a_1 \cdot u + a_2 \cdot u^2 + a_3 \cdot u^3 + a_4 \cdot u^4 \quad [m] \quad (2.4)$$

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

### 2.2 Ecuación Dinámica del Agua

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

$$X_{n+1} = X_n + y_n - u_n \quad (2.5)$$

$n$  Índice de intervalo de tiempo;

$X_{n+1}$  Volumen de agua almacenada al inicio del intervalo  $n+1$ ;

$X_n$  Volumen almacenado en el embalse;

$y_n$  Afluencia natural;

$u_n$  Defluente;

$u = q - v$  Donde  $q$  es el volumen del caudal turbinado y  $v$  volumen del vertido

## 3 ENERGÍA FIRME Y ENERGÍA ASEGURADA

### 3.1 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.

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.

En la figura 3.1 se puede observar los periodos críticos de una central hidroeléctrica.

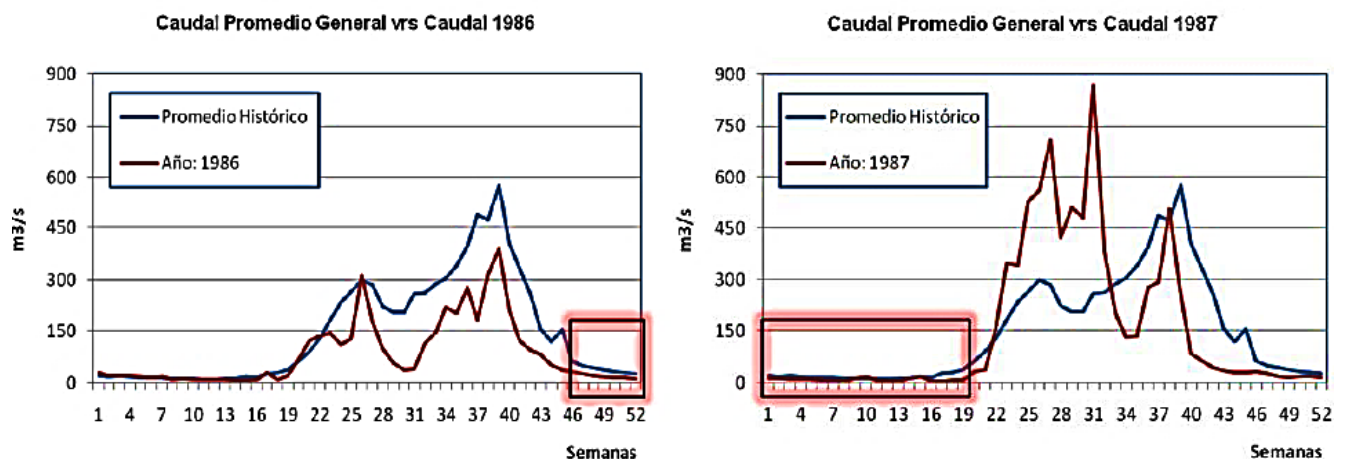


Figura 3.1: Periodo Crítico de Centrales Hidroeléctricas [1].

### 3.2 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].

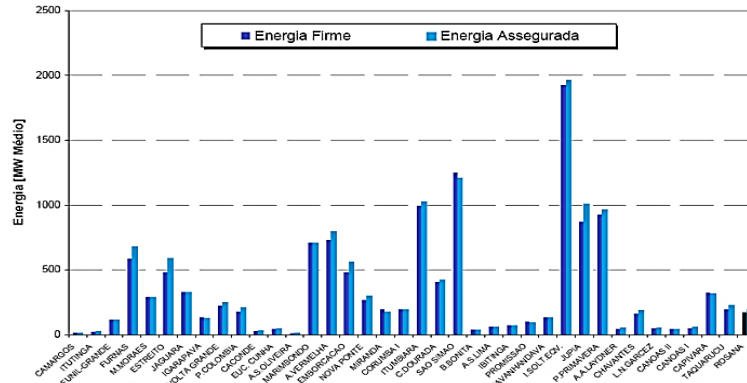
La posibilidad de un ocasional déficit o el atendimento con una probabilidad inferior al 100%, se denomina criterio probabilístico.

### 3.3 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 caudales naturales admitiendo un riesgo de no atendimento de la carga, es decir, un determinado x% de falta dentro del límite aceptado por las normas del sector eléctrico. La energía asegurada a diferencia de la energía firme es un término probabilístico pero el procedimiento para dicho cálculo es análogo al de energía firme.

La figura 4.3 muestra la energía firme y energía asegurada para varias centrales hidroeléctricas de Brasil.

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



**Figura 3.2: Energía Asegurada vs Energía Firme [4].**

### 3.4 CRITERIO DE RIESGO

El criterio de riesgo es un porcentaje de aceptación de déficit en lo que respecta a los certificados de garantía de las centrales. 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 de la demanda dentro del periodo de estudio y un 5% de probabilidad de que haya falla en el atendimento.

## 4. METODO

### 4.1. Algoritmo de simulación elaborado para el cálculo de Energía Firme

El primer paso para la aplicación de algoritmos es el dimensionamiento de las características de la central, son necesarias realizar algunos estudios de 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:

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

---

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  $v = \frac{X_{n+1} - X_{n+1}}{factor} [m^3/s]$  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  $X_{n+1} < X_{n+1}$ ; Se disminuye el caudal turbinado en  $q_{n+1} = q_{n+1} - \frac{X_{n+1} - X_{n+1}}{factor}$  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

$Fp_n(Hb)$ ; 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  $|P_n - ef| \leq \varepsilon$ . 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”

#### 4.2. 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.

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

5. Resultados

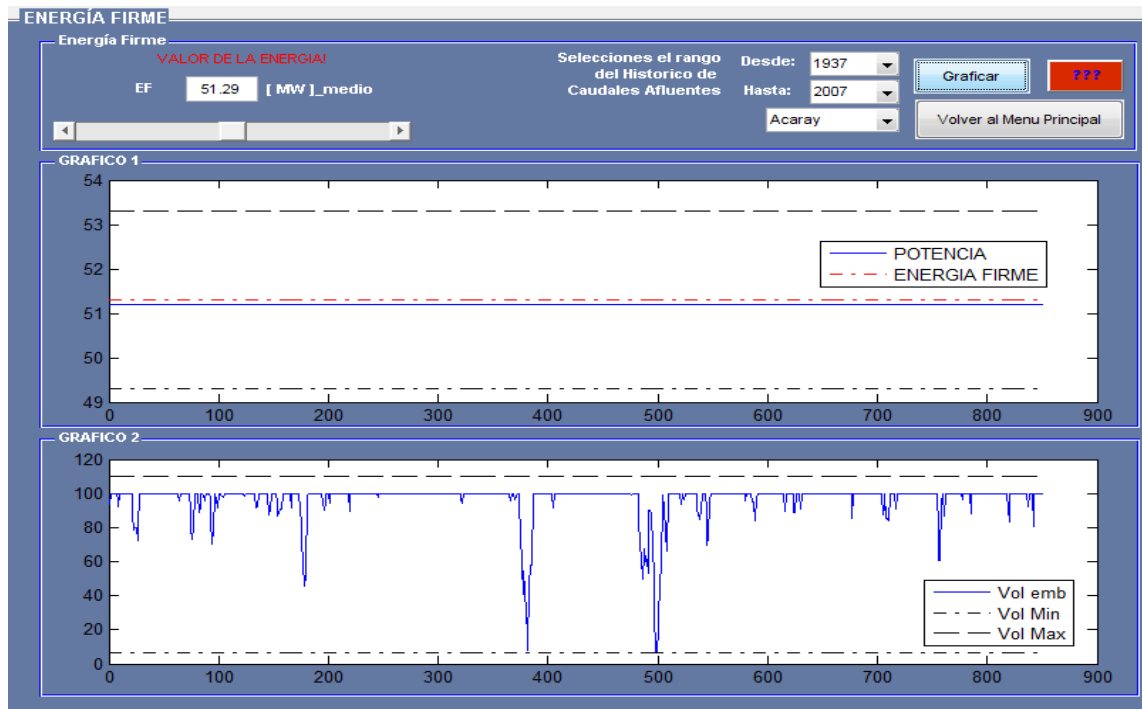


Figura 5.1: Vista del Simulador Calculo de Energía Firme.

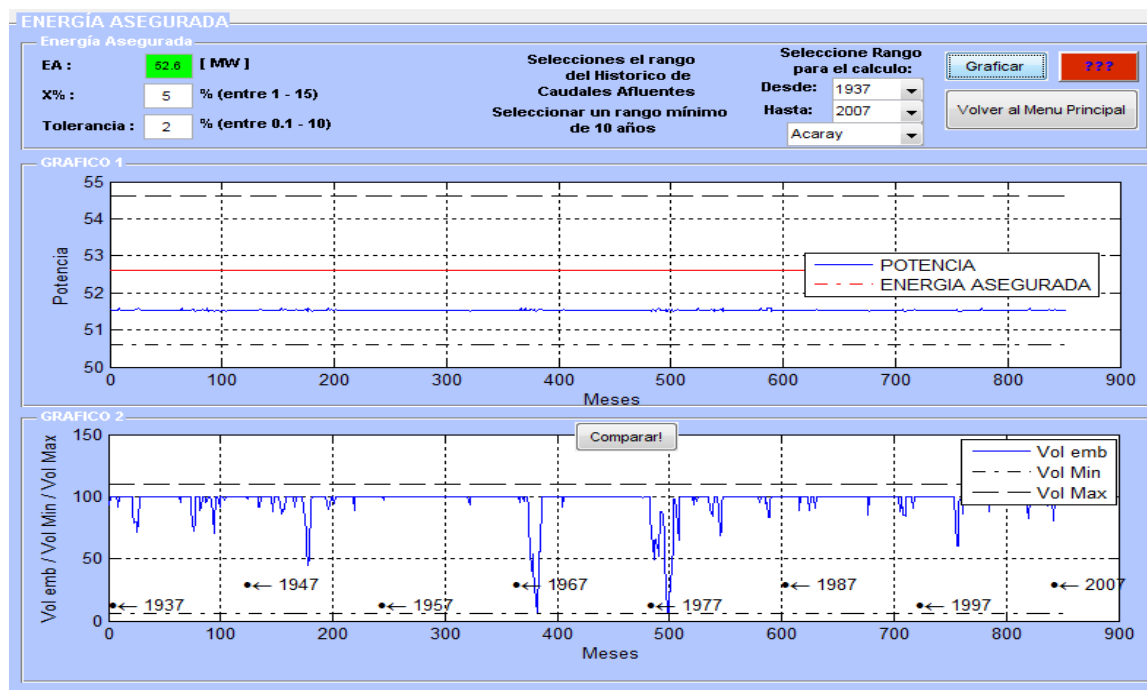


Figura 5.2: Vista del Simulador Calculo de Energía Asegurada.

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

Las figuras 5.1 y 5.2 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 río 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.

**Tabla I: Resultados Obtenidos**

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

## 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 51,29MW-med, 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 52,6MW-med, con esto se puede afirmar que la energía eléctrica que la central podrá garantizar es de 52,6MW-med.

## 7. Referencias Bibliográficas

- [1] Cigogna, M.A. *Modelo de Planejamento de Operação Energetica de Sistemas Hidrotérmicos a Centrais Individualizadas Orientada por Objetos*. Tese de Mestrado. Campinas: Universitária. (1.999).
- [2] García, R.; *Simulación de la Operación Hidroenergética y Cálculo de la Energía Firme*. Universidad Nacional del Este, Paraguay. Abril 2.006.
- [3] Centrales Hidroeléctricas. Disponible en línea:  
<http://www.olade.org/sites/default/files/06%20SESION%2006%20C%2011%20CENTRALES%20HIDROELECTICAS%20Ar>. Acceso el 15 de octubre de 2015
- [4] Santos, R.; *Ferramenta para Avaliação da Energia Firme Baseada em Técnica de Pontos Interiores*, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora Faculdade de Engenharia, MG – BRASIL, 2008
- [5] 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