

Estudio de Generación con Recursos Hidroeléctricos y Fotovoltaicos en el Sistema Eléctrico Hondureño Usando Métodos Estadísticos.

Study About Generation with Hydroelectric and Photovoltaic Resources in the Honduran Electric System Using Statistical Methods

JORGE A. PÉREZ¹ | RAMÓN O. ESCALÓN²

Recibido: 20 de marzo 2017/ Aceptado: 17 de noviembre de 2018

¹Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Escuela de Física, email jperez@unah.edu.hn

²Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Escuela de Física, email ramon.escalon@unah.edu.hn

En este artículo se muestran los conceptos básicos sobre un sistema eléctrico con diversas tecnologías de generación. También se pretende mostrar una comparativa de la política operacional del sistema y una simulación tomando en cuenta datos históricos de recurso hidroeléctrico y fotovoltaico. El objetivo principal es mostrar una propuesta con diferentes escenarios probabilísticos de programación para el recurso hídrico y se considerarán variaciones a corto plazo de potencia de salida en centrales fotovoltaicas.

In this article we introduce basic concepts of an electric system with many generation technologies. We also show a comparison between the operational politics of the system and a simulation, with hydroelectric and fotovoltaic resources historical data. The main objective is to give a proposal with different probabilistic scenarios for planning of the water resources considering short term power output variations from the fotovoltaic centrals.

PALABRAS CLAVES

Sistemas hidroeléctricos, sistemas fotovoltaicos, despacho económico, política operativa energética.

KEYWORDS

Hydroelectric systems, photovoltaic systems, economical dispatch, energy operational politics

PACS

88.40.-j, 88.40.fc, 88.05.Jk, 88.05.Lg

I | INTRODUCCIÓN

En un sistema eléctrico es común encontrar diversos tipos de tecnologías utilizadas en conversión de energía eléctrica. Estas tecnologías tienen distintos tipos de operación y por ende costos ambientales y económicos asociados. El problema es administrar los recursos -tanto renovables como no renovables-

* Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial 4.0 Internacional © ⓘ

* This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. © ⓘ

para poder suplir la demanda energética del sistema en su totalidad al menor impacto posible.

Se presentarán los resultados de simulaciones utilizando datos históricos de recursos hídricos y solares, para comparar la operación real del sistema mes a mes con diferentes escenarios de aporte hidrológico mensual y variaciones de recurso solar a corto plazo.

II | CONCEPTOS Y DEFINICIONES

Se definen los conceptos principales en cuanto a los tipos de centrales y modelos matemáticos utilizados para la planificación de operación de recursos energéticos. Wood y Wollenberg (2012) Chan (2011)

1 | Central Hidroeléctrica

Centrales que utilizan la energía potencial almacenada en cuerpos de agua llamados embalses para producir energía eléctrica, estas centrales pueden ser de embalse que permite almacenar agua para su uso posterior, o centrales de filo de agua que permiten la operación cuando hay caudal suficiente en un río.

2 | Central Térmica

Centrales que utilizan la energía obtenida a través de combustión de algún tipo de material inflamable de origen fósil o derivado de biomasa para la conversión de energía. Se basan en ciclos termodinámicos para conversión de energía térmica a cinética por medio de turbinas o motores de combustión interna para la posterior conversión a energía eléctrica.

3 | Central Solar Fotovoltaica

Central que aprovecha la radiación solar y el efecto fotovoltaico para convertir energía cinética de los fotones a energía eléctrica, estas centrales dependen totalmente de la incidencia de radiación solar en ella y son altamente susceptibles a variaciones climáticas. El efecto fotovoltaico aprovecha la interacción de los fotones incidentes y materiales semiconductores combinados de manera que formen una unión PN. Esto permite aprovechar la diferencia de potencial producida en los materiales semiconductores.

4 | Despacho Económico

Programación de la forma en la que deben trabajar las centrales de generación en el sistema para cumplir los requerimientos económicos y técnicos para la operación del sistema eléctrico. Usualmente se programan las centrales de forma horaria para poder adaptarse a las variaciones diarias de la demanda en un sistema eléctrico.

5 | Configuración del Sistema

El modelo más simple de un sistema eléctrico incluye un barraje único con la generación y la carga conectados a él. En este se muestra un sistema similar al nacional, considerando el recurso solar, hidroeléctrico y térmico. Wood y Wollenberg (2012) Bedoya y Barrera (2005)

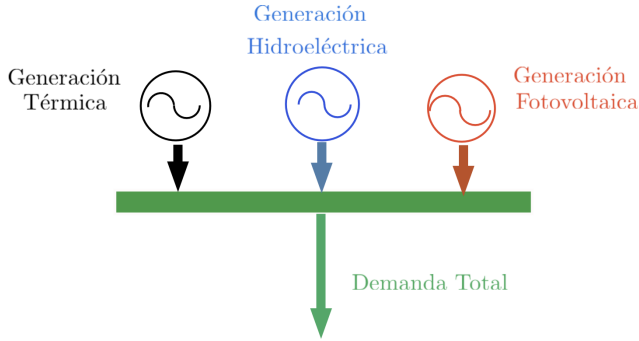


Figura 1: Diagrama Unifilar del Sistema eléctrico a modelar

III | SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

La matriz energética del país se compone de diversos recursos aprovechables para cubrir una capacidad instalada total de 2605.71MW de potencia. Esta se distribuye de la siguiente manera: ENEE (2007-2016)

Nº	Tecnología	Potencia Inst. (MW)	Porcentaje (%)
1	Hidroeléctrica	685.0	26.3
2	Térmica	1000.1	38.4
3	Biomasa	209.7	8.0
4	Eólica	225.0	8.6
5	Fotovoltaica	450.9	17.3
6	Geotérmico	35.0	1.3
Total		2605.71	100

Tabla 1: Capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional a junio 2018. ENEE (2007-2016)

La demanda nacional es aproximadamente de 1500MW en su punto máximo, los cuales en su mayoría son suministrados por centrales termoeléctricas e hidráulicas -aproximadamente 67%- y el resto por otro tipo de centrales. ENEE (2015.a)

Se ha propuesto un cambio en la matriz energética para que la mayoría de la demanda se pueda suplir con recursos renovables y en principio tener costos sostenibles de generación en el sistema.

1 | Distribución de la Energía Generada

La distribución de la capacidad instalada en el sistema nacional no refleja la contribución de cada tipo de recurso al consumo energético. Para ello es necesario observar como se distribuye la generación de cada tipo de tecnología en los últimos años.

De la figura se aprecia el efecto que ha tenido la inserción de los recursos renovables en la matriz energética, esto permite reducir la cantidad de energía que se requiere de centrales térmicas. El mayor

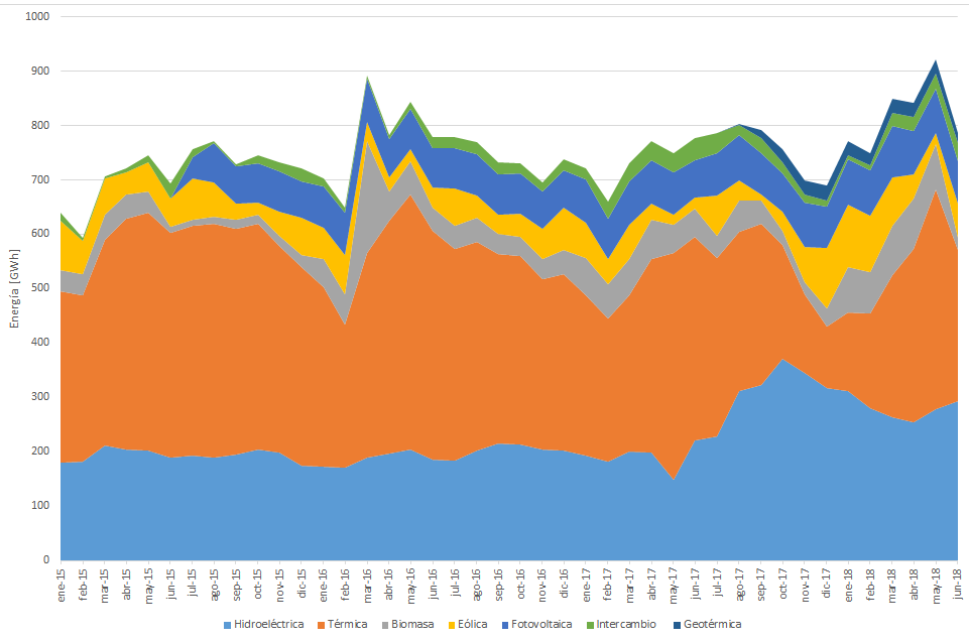


Figura 2: Generación mensual por tecnologías en el Sistema Eléctrico Nacional. ENEE (2007-2016)

efecto de esto se dió en los meses de octubre 2017 a enero 2018, durante los cuales un incremento en la cantidad de generación con recursos hidroeléctricos y eólicos permitió cubrir la mayoría de la demanda con recursos renovables.

Concentrándose en los recursos hidroeléctricos y fotovoltaicos, estos han contribuido de gran manera al funcionamiento del sistema. El recurso hidroeléctrico se ha usado históricamente como generación de base y el recurso solar contribuye en suplir la demanda en horas pico durante el día cuando su generación es máxima.

IV | CONSIDERACIONES PARA EL RECURSO HIDRÍCO

El recurso hídrico tiene la característica que las etapas en las que se encuentra dependen de las decisiones tomadas en etapas anteriores, por eso este recurso tiene una dependencia temporal y probabilística.

1 | Uso de los embalses

Hay dos casos generales en cuanto al uso del agua almacenada en los embalses, dichos casos tienen sus respectivas consecuencias en etapas posteriores de la planificación: Bedoya y Barrera (2005) Chan (2011)

Uso del Embalse: Los posibles escenarios en etapas posteriores que se pueden presentar son los siguientes:

- Poca afluencia: Al utilizar el recurso en el presente se tendría un costo actual de generación bajo para el sistema, pero esto traería problemas en etapas posteriores ya que no habría disponibilidad de agua suficiente y sería necesario suplir la demanda con generación térmica a mayor costo.
- Mucha afluencia: Este es uno de los casos favorables ya que permite reducir costos de generación en el sistema al utilizar los embalses para sustituir generación térmica en el presente y también es posible hacerlo para las etapas posteriores de la planificación.

No Usar el Embalse: En este caso se presentarían los siguientes escenarios:

- Poca afluencia: Este escenario sería favorable, los embalses tendrían niveles apropiados de agua, y en las etapas posteriores se podría sustituir la generación térmica por la generación hidroeléctrica de menor costo para el sistema.
- Mucha afluencia: Debido a que los niveles de agua en el embalse son relativamente altos, la afluencia futura elevada haría que el embalse no pueda almacenar toda el agua que recibiría y sería necesario verter el agua extra sin turbinar.

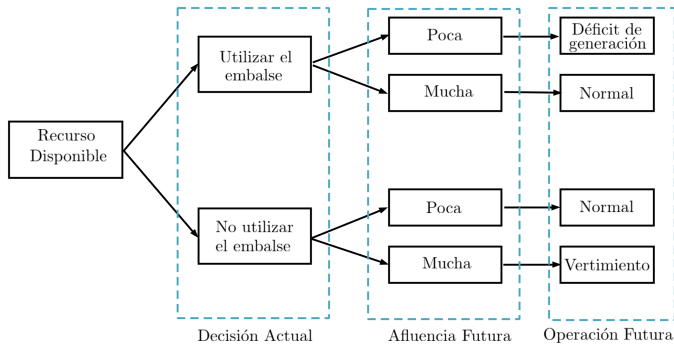


Figura 3: Esquema de decisión para recursos en embalse

2 | Costo Operativo de Turbinamiento: Costo inmediato y futuro.

Al descomponer el problema del despacho económico de largo plazo en etapas, entran dos tipos de costo operativo, un costo operativo inmediato y un costo operativo futuro. El costo operativo inmediato mide los costos de generación térmica en una etapa determinada; este costo disminuye a medida aumenta la energía base hidroeléctrica utilizada.

El costo operativo futuro se calcula a través de simulaciones operativas del sistema para diferentes niveles de almacenamiento inicial. El horizonte de la simulación utilizada depende de la capacidad de almacenamiento del sistema. Los estudios de simulación se hacen de forma probabilística considerando distintos casos de afluencia futura, considerando las condiciones óptimas de operación. Bedoya y Barrera (2005)

2.1 | Costo del Agua

El costo del agua se debe calcular para cada una de las etapas, representa para el agua almacenada, el costo futuro esperado de reemplazo de energía con generación térmica o de otro tipo. Permite definir la cantidad óptima de agua a utilizar para cumplir los objetivos con el volumen inicial disponible y el volumen final objetivo en cada etapa considerada. Bedoya y Barrera (2005)

V | CONSIDERACIONES PARA EL RECURSO SOLAR

Para estudiar el recurso es necesario conocer las condiciones de irradiancia a la latitud de interés, así como las condiciones climáticas estacionarias en la zona.

Para ello se llevan a cabo estudios para medir valores promedio de los parámetros solares en la locación y se dispone de *mapas solares* que incluyen esta información.

1 | Disponibilidad del Recurso

En los estudios realizados sobre el potencial solar en el país, se ha determinado las zonas con mayor recurso aprovechable, estas zonas disponen aproximadamente de 7 horas sol equivalentes en promedio anual, aunque hay regiones en el sur del país con una irradiancia mayor donde se han instalado distintos proyectos de generación fotovoltaica. Flores Barahona y cols. (2001)

2 | Aleatoriedad del Recurso

Debido a las variaciones climáticas no es posible utilizar un modelo determinístico para predecir la disponibilidad energética debido al recurso solar. Por ello se consideran datos históricos y modelos climáticos aproximados para obtener valores esperados de irradiancia para un tiempo específico.

VI | MODELO MATÉMATICO

1 | Datos Disponibles para el Estudio

La información sobre energía disponible fue obtenida de los boletines estadísticos publicados por la Empresa Nacional de Energía Eléctrica -ENEE- desde el año 2007 al 2015, se tomaron datos de energía generada con recurso hídrico de manejo estatal y se estudió de forma separada la central hidroeléctrica Francisco Morazán.

En cuanto al recurso solar se tomaron los datos del Proyecto Demostrativo La Cañada, utilizando datos de la potencia de salida de los módulos fotovoltaicos y obteniendo las variaciones de dicha potencia en intervalos de 15 minutos.

2 | Programación Dinámica

Es una técnica secuencial desarrollada por Richard Bellman y G. Dantzing. La programación dinámica (PD) determina la solución óptima de un problema de n variables descomponiendo el problema en

k etapas, cada una incluyendo su propio sub-problema. La clave de la PD está en el *principio de optimalidad*, el cual indica que una política óptima se compone de subpolíticas óptimas. Marundala, Artigas, y Vilchez (2011)

2.1 | Características de los problemas de PD

- El problema se puede dividir en sub-etapas que requieren una política de decisión en cada una de ellas.
- Cada etapa tiene una cantidad de estados asociados a ella.¹
- El efecto de la política de decisión es transformar el estado actual en una etapa a un estado asociado a la etapa siguiente.
- El procedimiento de solución está diseñado para encontrar la solución óptima al problema global.
- Considerando un estado actual, una política óptima para las etapas restantes es independiente de la política adoptada en etapas anteriores. Esto indica que el estado actual del sistema expresa toda la información sobre su comportamiento anterior.
- Se dispone de una relación recursiva que indica la política óptima para la etapa k , dada la política óptima para la etapa $k + 1$.

3 | Programación Dinámica Estocástica

Es una técnica útil para la toma de decisiones interrelacionadas, se utiliza cuando no se conocen totalmente los estados asociados a la etapa siguiente, sino que se conoce la distribución de probabilidad para determinar esos estados.

4 | Técnica Utilizada para el Análisis de Datos

Se utilizaron los datos disponibles para hacer un ajuste a una curva de densidad de probabilidad con distribución normal para cada mes y así obtener un valor esperado medio con cotas superiores e inferiores de variación, es posible realizar programación dinámica simple en cada mes para hacer estimaciones de cual es la mejor opción para reducir la cantidad de energía termoeléctrica necesaria en el sistema.

De igual forma se calculó la probabilidad de variación de potencia de salida de una central fotovoltaica, considerando probabilidad simple con escenarios favorables para un criterio determinado y el total de casos ocurridos.

VII | APLICACIÓN AL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

1 | Condiciones Consideradas en el Sistema Eléctrico Nacional

Para el sistema eléctrico se tomará en cuenta solamente la cantidad de energía disponible a generar con recursos renovables, el objetivo principal será reducir la cantidad de energía a compensar con recursos termoeléctricos, ya sea debido a límite de disponibilidad hidroeléctrica o debido a variaciones grandes de potencia de salida fotovoltaica. Para hacer la programación se tomarán en cuenta los rangos obtenidos por medios estadísticos utilizando una distribución normal.

¹ Estado es la información necesaria en cualquier etapa para tomar la decisión óptima

1.1 | Demanda

Para la demanda se obtuvo la información de energía total facturada en el sistema para todos los meses durante 2015 y se consideró el incremento proyectado para el año siguiente según estudios realizados por la Empresa Nacional de Energía Eléctrica. ENEE (2007-2016) ENEE (2015b)

Mes	Año 2015 (GWh)	Proy. 2016 (GWh)
Enero	448.4	475.3
Febrero	433.2	459.2
Marzo	429.1	454.8
Abril	488.2	517.5
Mayo	513.0	543.8
Junio	504.7	535.0
Julio	503.2	533.4
Agosto	516.4	547.4
Septiembre	507.8	538.3
Octubre	494.1	523.7
Noviembre	502.3	532.4
Diciembre	471.5	499.8
Total anual	5811.9	6160.6

Tabla 2: Energía generada 2015 y proyección de energía para 2016. ENEE (2007-2016) ENEE (2015b)

1.2 | Recurso Hidroeléctrico Considerado

Los rangos de energía hidroeléctrica disponible se obtuvieron utilizando datos históricos para obtener una función de densidad de probabilidad y así tener un intervalo de confianza para la energía disponible anualmente. La curva de probabilidad normal tiene la forma:

$$PDF(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{ \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} \tag{1}$$

Donde el valor de μ representa el valor medio de la densidad y σ el valor de desviación estándar para la función. El intervalo utilizado para los cálculos fue el definido por $\mu - \sigma$ a $\mu + \sigma$ donde la probabilidad acumulada dentro de este intervalo es del 68.2%.

Año	Centrales Estatales	Francisco Morazán
2006	1938.3	1038.6
2007	2021.7	1236.3
2008	2005.7	1298.0
2009	2533.8	1689.0
2010	2707.5	1812.1
2011	2467.8	1562.2
2012	2399.2	1525.2
2013	2274.4	1411.4
2014	1883.9	1126.7
2015	1623.9	969.0

Tabla 3: Datos de generación total anual en GWh. ENEE (2007-2016)

Tomando en cuenta los valores de energía anual, es posible obtener valores medios y desviaciones estándar. Los valores se obtuvieron suponiendo una distribución de probabilidad normal con los parámetros μ y σ con una función con forma similar a [1].

Tipo	μ (GWh)	σ (GWh)
Centrales Estatales	2185.6	324.6
Central F.M.	1366.9	267.0

Tabla 4: Media y desv. estándar para generación hidroeléctrica anual.

La función de densidad de probabilidad que se construye con estos parámetros tiene una curva similar a la mostrada en las siguientes figuras.

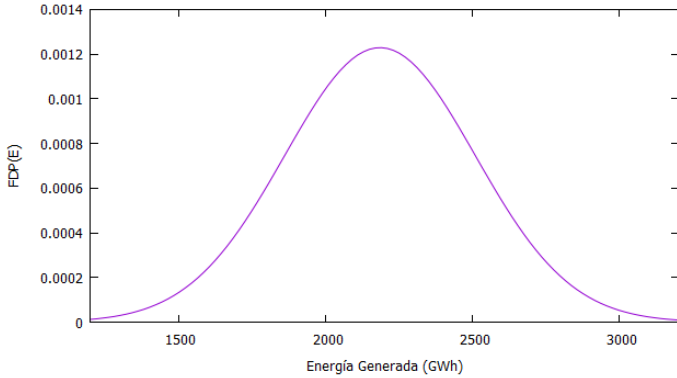


Figura 4: PDF de la energía hidroeléctrica generada anualmente en proyectos estatales

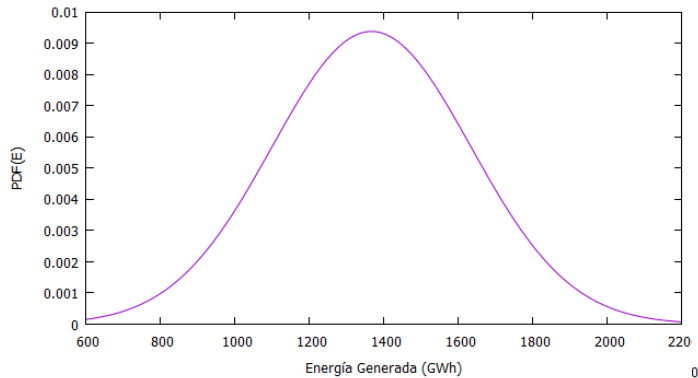


Figura 5: PDF de la energía hidroeléctrica generada anualmente en la central Francisco Morazán

1.3 | Condiciones del Recurso Solar

Los datos disponibles de recurso solar se obtuvieron de la Planta Demostrativa La Cañada ubicada en el Distrito Central, se utilizaron los datos de potencia total de salida para calcular las variaciones y la magnitud de estas variaciones en la potencia. Para estos datos el interés fue considerar la probabilidad de variaciones grandes en intervalos de 15 minutos. Con los datos disponibles se realizó un conteo de variaciones dependiendo de su magnitud. Se consideró para cada set de datos variaciones menores a 5% hasta variaciones mayores al 20% en saltos de 5%.

Los datos se encontraban separados de forma mensual, para cada mes de información disponible los datos estaban registrados de forma diaria y con intervalos de 15 minutos entre registro. Este nivel de detalle permitió calcular probabilidades para cada intervalo requerido de forma mensual y anual.

El comportamiento usual de una central fotovoltaica sigue una curva como la siguiente: Considerando una curva usual de generación de una central fotovoltaica se observa la notoria disminución de potencia de salida en horas cercanas al inicio o final del día.

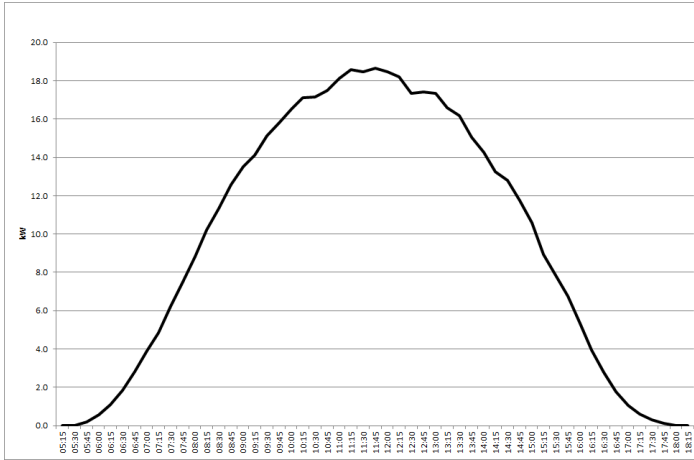


Figura 6: Curva típica de generación diaria para una central fotovoltaica.

Este comportamiento es susceptible a condiciones atmosféricas, para efectos de este estudio solamente se considerarán las probabilidades de variación en intervalos cortos de tiempo.

VIII | PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

1 | Simulación

1.1 | Recurso Hidroeléctrico

Considerando que los datos de energía generada estaban disponibles solamente de forma mensual, se obtuvo una función de densidad de probabilidad (PDF o FDP) para la energía generada mensual y anualmente. Al utilizar una distribución normal de probabilidad se determinó una media de energía μ y la desviación respecto a esa media σ , los parámetros μ y σ corresponden a los de la función mostrada en [1].

Los valores μ y σ permitieron determinar cotas para la generación de energía de forma mensual y anual dentro de un intervalo de confianza del 67%. Los resultados obtenidos de la media de energía mensual y su respectiva desviación son los siguientes:

Mes	μ (GWh)	σ (GWh)
Enero	161.4	33.4
Febrero	150.6	31.9
Marzo	166.7	23.1
Abril	173.4	21.5
Mayo	191.7	31.3
Junio	193.5	36.9
Julio	191.3	38.5
Agosto	190.4	39.4
Septiembre	174.0	31.1
Octubre	199.8	41.1
Noviembre	181.4	42.0
Diciembre	175.3	44.7

Mes	μ (GWh)	σ (GWh)
Enero	102.5	27.8
Febrero	96.2	26.2
Marzo	109.1	14.7
Abril	114.4	14.4
Mayo	126.3	22.9
Junio	123.4	31.1
Julio	122.7	27.9
Agosto	118.2	27.1
Septiembre	102.0	21.0
Octubre	121.7	33.6
Noviembre	117.5	36.5
Diciembre	111.6	36.9

Tabla 5: Valores medio y desv. estándar de energía generada por centrales estatales

Tabla 6: Valores medio y desv. estándar de energía generada por central Francisco Morazán

Posterior a obtener estos valores, se calcularon los valores máximos y mínimos de energía a generar para el intervalo $E_{mn} = \mu - \sigma$ y $E_{mx} = \mu + \sigma$. Este intervalo es el que se definió para tener una certeza del 67% en los resultados. Al obtener este rango permitido de energía disponible para generación en cada mes, se procedió a utilizar la herramienta solver de MS Excel, esta permite optimizar un escenario con las condiciones establecidas, las cuales para nuestro caso fueron:

- Para cada mes se restringe la energía en el intervalo descrito por el párrafo anterior.
- El objetivo de la optimización era llegar a un valor fijo de energía generada de forma anual, variando la energía a utilizar en cada mes.
- Se simularon tres escenarios, uno optimista en el cual la energía disponible para todo un año

era la máxima energía anual según la media y desv. estándar del cuadro 4, un escenario medio en el cual la energía disponible era el promedio mostrado en dicho cuadro y por último un escenario pesimista donde la energía disponible era la mínima según los parámetros del cuadro 4.

La herramienta Solver utiliza programación dinámica para obtener una solución óptima con las condiciones que se le brindan como entrada, para nuestro caso los resultados de la simulación para las centrales estatales y la central Francisco Morazán son los siguientes:

Mes	Optimista	Medio	Pesimista
Enero	190.2	165.6	138.6
Febrero	178.0	156.3	129.3
Marzo	185.3	181.2	154.2
Abril	190.4	189.5	162.5
Mayo	218.4	198.0	170.9
Junio	225.9	194.2	167.1
Julio	225.3	190.4	163.3
Agosto	225.3	188.6	161.6
Septiembre	200.5	180.5	153.4
Octubre	236.4	196.2	169.1
Noviembre	218.9	176.9	149.9
Diciembre	215.5	168.2	141.2
Total anual	2510.2	2185.6	1861.0

Mes	Optimista	Medio	Pesimista
Enero	126.0	103.8	74.8
Febrero	118.1	95.9	70.0
Marzo	119.5	97.2	94.4
Abril	124.5	102.3	100.0
Mayo	144.9	122.7	103.4
Junio	150.1	127.9	98.9
Julio	146.2	124.0	95.0
Agosto	141.0	118.7	91.2
Septiembre	118.6	96.4	81.0
Octubre	151.0	128.8	99.8
Noviembre	149.7	127.5	98.5
Diciembre	144.2	121.9	93.0
Total anual	1633.8	1366.9	1099.9

Tabla 7: Escenario de simulación propuesta con los tres escenarios de generación en centrales hidroeléctricas estales para cada mes, en GWh. Tabla 8: Escenario de simulación propuesta con los tres escenarios de generación hidroeléctrica en la represa F.M. para cada mes, en GWh.

Con la simulación se pretende definir la energía a generar con recursos hidroeléctricos para predicciones optimistas, medias y pesimistas en cuanto a afluencia en las centrales. Partiendo del estudio mensual se puede hacer planificación a mediano y corto plazo en la planificación del uso de los recursos hídricos. Se puede plantear un escenario semanal y posteriormente uno diario de energía generada hasta obtener una estimación para la programación de corto plazo la cual puede ser horaria.

1.2 | Recurso Solar

Los resultados del cálculo de probabilidad se muestran a continuación:

Mes	<5%	5% - 10%	10% - 15%	15% - 20%	>20%
Enero	48%	25%	13%	8%	6%
Febrero	54%	23%	11%	7%	5%
Marzo	48%	24%	12%	9%	7%
Abril	67%	18%	8%	5%	2%
Mayo	67%	18%	8%	5%	2%
Junio	47%	24%	16%	9%	5%
Julio	49%	27%	14%	6%	4%
Agosto	49%	24%	11%	8%	8%
Septiembre	44%	22%	16%	11%	8%
Octubre	48%	22%	15%	10%	6%
Noviembre	54%	22%	12%	6%	6%
Diciembre	54%	25%	10%	7%	4%
Total anual	52%	23%	12%	8%	5%

Tabla 9: Cálculo de probabilidades de variación del recurso solar.

Esta variación del 5% en la producción fotovoltaica representa aproximadamente 22MW de la capacidad de centrales FV instaladas en el país. También es necesario considerar el hecho que las variaciones grandes en el orden de 20% es más probable que ocurran a horas cercanas al amanecer o al atardecer por lo cual la generación en esos instantes es menor debido a la baja disponibilidad del recurso.

Desafortunadamente al no contar con datos suficientes en cuanto a generación fotovoltaica no es posible realizar estimaciones estadísticas para la energía que se tendrá disponible mes a mes como se hizo con el recurso hídrico.

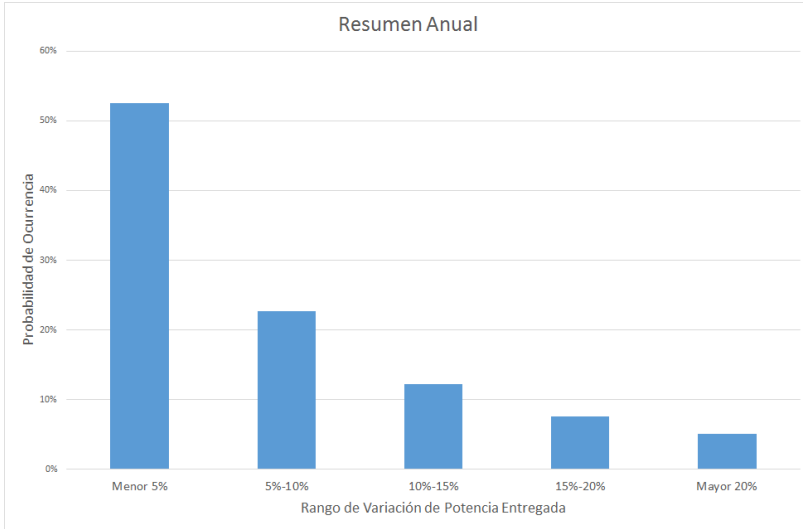


Figura 7: Gráfico con probabilidades de variacion de potencia de salida de una central FV.

2 | Análisis de Resultados

Al comparar los resultados obtenidos en los tres escenarios es posible observar que la política operativa real no es muy distante de uno de ellos, lo que se ha generado es similar al caso pesimista de programación. Esto parece tener sentido ya que el año 2015 e inicios de 2016 fue marcado por sequía debido al fenómeno del niño, lo cual generó baja afluencia en los embalses del país.

El hecho de tener estos tres escenarios facilita el análisis para diversos fenómenos estacionarios como El Niño o La Niña los cuales tienen una repercusión a gran escala en los recursos disponibles para generación.

Mes	Generación Est. (GWh)	Generación FM (GWh)
Enero	108.4	66.1
Febrero	90.8	53.7
Marzo	121.2	83.2
Abril	137.2	95.1
Mayo	139.7	95.1
Junio	116.2	93.3
Julio	106.7	90.9
Agosto	112.2	93.9
Septiembre	116.3	87.1
Octubre	112.3	88.1
Noviembre	95.3	75.8
Diciembre	99.5	79.3
Total anual	1355.8	1001.6

Tabla 10: Generación real para cada mes en 2016. ENEE (2007-2016)

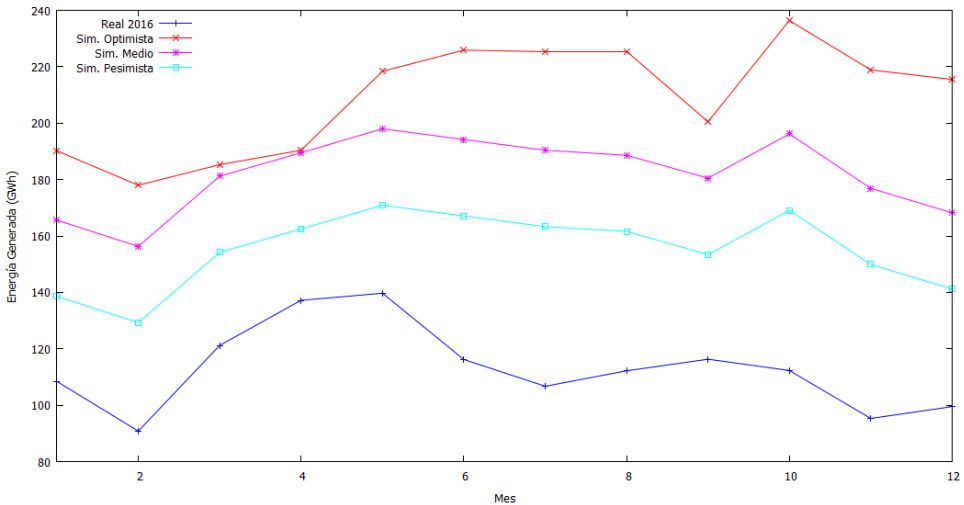


Figura 8: Comparación de energía generada con escenarios de la simulación con centrales hidroeléctricas estatales.

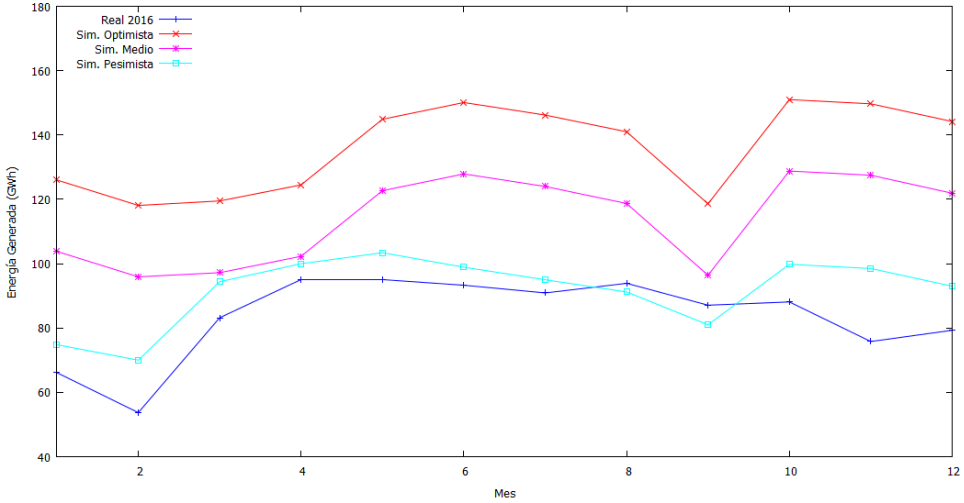


Figura 9: Comparación de energía generada con escenarios de la simulación en la central Francisco Morazán.

Se observa en las gráficas de comparación la diferencia marcada en la simulación pesimista y la operación real en 2016, esto indica una repercusión considerable del fenómeno de El Niño. Este efecto se observa en menor medida en la central FM debido a la capacidad de su embalse ya que en la figura 8 se observa la similitud del escenario pesimista con la operación real.

Respecto a las variaciones de potencia de salida de una central fotovoltaica una variación del 20% representa aproximadamente 78%. Esto representa un 6% de la demanda máxima para el año 2015, lo cual es posible suplir con la reserva que se suele programar para un sistema eléctrico que está en el orden de 5% a 8%.

IX | CONCLUSIONES

La política operativa real es en cierta medida similar a la propuesta realizada en la simulación, el uso de recursos hidroeléctricos no es inadecuado en el sistema.

Las razones para la diferencia están en la falta de datos de hidrología y capacidad técnica de las centrales estatales por lo cual no es tan sencillo realizar una programación dinámica totalmente adecuada. Otra razón de la diferencia en la operación es el tipo de servicios complementarios que debe suministrar la central Francisco Morazán, al tener que encargarse de esto no es sencillo programar la central de la forma óptima más deseable.

También es necesario considerar las pérdidas de agua en la central Francisco Morazán esto reduce en gran medida la energía que es posible generar en dicha central.

Al intentar incluir la variación del recurso solar se observa que la mayoría de ocasiones no es necesario programar una cantidad enorme de reserva rodante para poder compensar las fluctuaciones.

En cuanto la cantidad de energía disponible a generar o potencia de salida de una central FV, es posible estudiar la correlación entre los eventos meteorológicos como cobertura de nubes y la radiación

incidente. Esto puede realizarse en estudios posteriores con la información mencionada para desarrollar un medio de estimación a corto plazo.

X | REFERENCIAS

I REFERENCIAS

- Bedoya, J. C., y Barrera, M. (2005). Programación dinámica estocástica aplicada al problema del despacho hidrotérmico. *Scientia et Technica*, 11(28).
- Chan, D. F. S. (2011). *Optimización del despacho hidrotérmico estocástico del sni para un estudio de largo plazo* (Tesis de Master no publicada). Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Guatemala.
- ENEE, P. (2007-2016). *Boletín estadístico* (Inf. Téc.). Empresa Nacional de Energía Eléctrica. Descargado de <http://www.enee.hn/index.php/planificacion/icono/182-boletines-estadisticos>
- ENEE, P. (2015.a). *Diagrama ordenado de duración de carga en el sin* (Inf. Téc.). Empresa Nacional de Energía Eléctrica. Descargado de [http://www.enee.hn/planificacion/2016/Cobertura/PUB-CURVA-CARGA-2015%20\(31-05-16\).pdf](http://www.enee.hn/planificacion/2016/Cobertura/PUB-CURVA-CARGA-2015%20(31-05-16).pdf)
- ENEE, P. (2015b). *Proyección de demanda en el sin* (Inf. Téc.). Empresa Nacional de Energía Eléctrica. Descargado de [http://www.enee.hn/planificacion/2016/TABLA-ESC-BASE-PROY-DDA-2017-2031%20NOV-16%20\(28-11-16\).pdf](http://www.enee.hn/planificacion/2016/TABLA-ESC-BASE-PROY-DDA-2017-2031%20NOV-16%20(28-11-16).pdf)
- Flores Barahona, M. A., y cols. (2001). Estudio preliminar de la heliofanía en honduras. En *Congreso de centroamerica y panamá de ingeniería sanitaria y ambiental*, 22 (pp. 1-6).
- Marundala, A., Artigas, M., y Vilchez, J. (2011). Métodos de solución aplicados al problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo. *Revista INGENIERÍA UC*, 18, 44-54.
- Wood, A. J., y Wollenberg, B. F. (2012). *Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons.

XI | ANEXOS

1 | Datos Recopilados de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica

Observaciones:

1. Los datos cuyos valores aparecen en 0.0 no se encontraban disponibles.
2. Todos los datos en unidades de GWh.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2007	145.1	131.6	158.8	186.2	231.3	187.0	166.2	168.5	157.0	0.0	148.2	136.4
2008	134.2	0.0	139.7	147.7	168.1	168.9	156.6	173.8	170.1	199.0	192.6	200.7
2009	208.3	208.3	201.8	213.9	243.2	255.6	236.0	208.5	208.4	202.2	191.7	186.3
2010	170.1	155.0	164.4	173.3	188.0	233.9	258.2	279.4	0.0	271.6	264.2	261.1
2011	194.6	157.1	176.8	183.4	196.6	0.0	0.0	0.0	0.0	220.4	0.0	186.7
2012	182.7	164.7	177.0	170.2	220.7	217.9	213.8	203.4	211.9	221.3	198.2	200.5
2013	191.5	173.3	185.3	194.5	194.0	174.7	192.2	189.0	201.1	203.6	197.0	178.1
2014	167.9	156.6	189.1	170.6	178.5	175.4	164.1	155.4	136.0	152.8	132.5	120.5
2015	111.1	118.1	153.3	157.2	156.5	134.6	143.3	145.7	133.3	127.2	126.6	107.8

Tabla 11: Datos de energía generada con recursos hidroeléctricos estatales para los años 2007-2015. ENEE (2007-2016)

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2007	81.6	82.2	102.3	123.6	155.2	115.4	102.3	102.9	87.0	0.0	90.7	86.1
2008	89.6	0.0	98.3	103.5	114.5	109.2	98.6	105.5	96.9	108.1	146.1	137.9
2009	151.6	151.1	137.5	144.0	168.4	179.0	161.3	132.9	132.7	134.0	109.9	112.0
2010	107.0	101.4	105.8	113.3	120.3	157.1	164.3	180.2	0.0	190.9	191.5	188.3
2011	131.0	98.9	112.4	121.5	132.0	0.0	0.0	0.0	0.0	128.3	0.0	113.2
2012	112.2	102.2	111.1	107.5	145.7	140.9	145.0	122.0	128.6	134.2	127.3	131.8
2013	127.3	112.6	121.9	129.6	124.5	104.9	113.0	116.1	111.2	120.5	122.4	107.5
2014	98.9	96.3	121.9	106.5	108.6	103.9	109.2	100.4	78.6	82.8	72.4	62.8
2015	59.5	67.3	96.4	99.1	98.6	76.5	87.8	85.6	78.7	75.1	80.0	64.4

Tabla 12: Datos de energía generada con recursos en la central hidroeléctrica Francisco Morazán para los años 2007-2015 ENEE (2007-2016)