

# Análisis de Estabilidad Transitoria del Sistema Nacional Interconectado Considerando la Incorporación de la Central Hidroeléctrica Manduriacu

**Daniel Villegas T.**

*Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional  
Quito, Ecuador*

**Jesús Játiva Ibarra**

*Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional  
Quito, Ecuador*

**Resumen-** En este trabajo se presenta un análisis de estabilidad transitoria del Sistema Nacional Interconectado (SNI) con la incorporación de la central hidroeléctrica Manduriacu, debido a la salida de carga y generación, en la zona de influencia del proyecto en los periodos de máxima y mínima demanda, para lo cual se establecen los ajustes necesarios en los sistemas de regulación de velocidad, voltaje y estabilizadores de sistemas de potencia, IEEE3, ST1 y PSS2A respectivamente, de las unidades de esta central.

Se analizan las respuestas de ángulos y velocidades en las unidades más importantes del SNI, voltaje y frecuencia en barras específicas, y transferencia de potencia en las líneas de la zona de influencia como en la línea de interconexión con Colombia, con la ayuda del paquete computacional DIgSILENT Power Factory.

**Palabras clave:** Estabilidad transitoria, Central hidroeléctrica Manduriacu, Modelos de componentes dinámicos, Sistema Nacional Interconectado, Salida de carga y generación, DIgSILENT.

**Abstract-** This paper presents a transient stability analysis of the National Interconnected System (SNI) up to the incorporation of the hydroelectric Manduriacu due to the output load and generation in the area of influence of the project during the periods of maximum and minimum demand, for which the necessary adjustments for the speed regulation, voltage and power system stabilizer of the units of Manduriacu are established, IEEE3, ST1 and PSS2A respectively.

It analyzes the responses of angles and speeds in the most important units of the SNI, voltage and frequency in specific busses, and transfer of power in the lines of the zone of influence and interconnection line with Colombia, with the help of the computer software DIgSILENT Power Factory.

**Key words:** Transient stability, Manduriacu hydroelectric power plant, Dynamic component models, National interconnected system, Loss of bus loads and generating units, DIgSILENT.

## I. INTRODUCCIÓN

Debido al constante crecimiento de la demanda es necesaria la incorporación de nuevas centrales de generación. Previo a la puesta de servicio de nuevas instalaciones es necesario conocer cuál será la respuesta del sistema ante la ocurrencia de desconexiones súbitas de

carga y generación, por ende cuáles deben ser las características específicas de los sistemas de control con el fin de prever la salida de unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Manduriacu de 60MW.

Para este análisis se utiliza el paquete computacional DIgSILENT Power Factory, que cuenta con las herramientas necesarias para estudios de estabilidad.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Estabilidad Transitoria

La estabilidad del ángulo del rotor en gran señal, se refiere a la capacidad para mantener el sincronismo del sistema cuando está sujeto a una perturbación severa que provoca grandes desplazamientos de los ángulos de los rotores de los generadores, tales como: pérdida de generación, pérdida de carga o fallas en las líneas de transmisión.

El tiempo de interés para estudios de estabilidad transitoria es usualmente de 3 a 5 segundos luego de la perturbación.

La relación altamente no lineal que existe entre la potencia de transferencia y la posición angular de los rotores de las máquinas sincrónicas, es una característica importante en cuanto a estabilidad de sistemas de potencia se refiere. En la Fig. 1 se muestra un generador que alimenta un motor mediante una línea de transmisión con reactancia  $X_L$ .

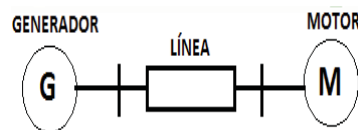


Fig. 1 Máquinas sincrónicas conectadas por una línea

En la Fig. 2 se presenta un modelo del sistema que puede ser usado para determinar la relación entre el ángulo y la potencia.

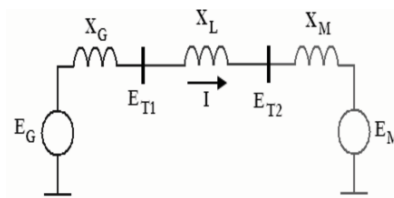


Fig. 2 Circuito equivalente del sistema generador-motor

Para el análisis de funcionamiento en estado estable, la potencia de transferencia del generador hacia el motor es dado por:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \text{sen} \delta = P_{max} \text{sen} \delta \quad (1)$$

Es apropiado usar la reactancia sincrónica donde:

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (2)$$

La Fig. 3 corresponde a la relación existente entre potencia y ángulo, la potencia varía con el seno del ángulo: relación altamente no lineal.

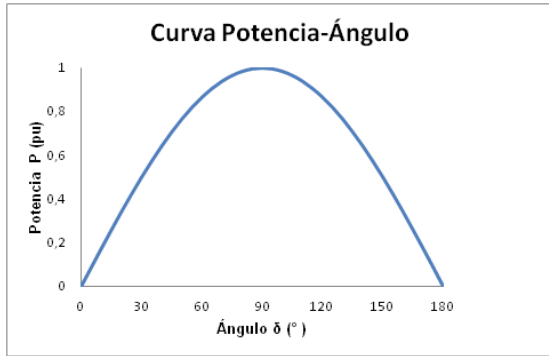


Fig. 3 Curva Potencia – Ángulo

Además, los sistemas de control al ser correctamente ajustados permiten que el grupo turbina-generador trabaje dentro de los rangos permitidos en condiciones de emergencia, ya que en condiciones normales los límites de las potencias activa y reactiva de un generador sincrónico vienen dados por las zonas seguras de operación. Los parámetros típicos para los sistemas de control que pueden ser usados están definidos por la IEEE.

Los sistemas de control se dividen en:

- Sistema de regulación de velocidad
- Sistema de regulación de voltaje
- Estabilizador de sistemas de potencia(PSS)

**B. Sistema de Regulación de Velocidad**

La función principal del regulador de velocidad es controlar la velocidad y/o la carga del generador. Este control tiene que ver con la realimentación de la variación de velocidad a fin de regular la posición de la compuerta.

El conjunto turbina-sistema de regulación de velocidad provee un medio para controlar la frecuencia y la potencia de salida de la planta de generación.

El sistema regulador de velocidad mecánico-hidráulico para una hidroturbina consiste de un regulador de velocidad, una válvula piloto y servomotor, una válvula distribuidora y un servomotor de válvula, y válvulas

controladas por el regulador de velocidad, como se muestra en la Fig. 4.

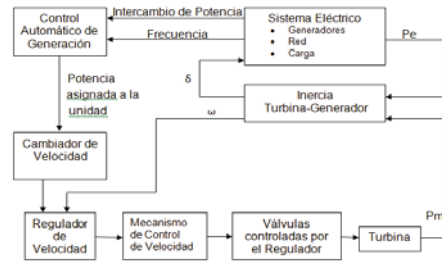


Fig. 4 Diagrama de bloque funcional del Sistema de regulación de velocidad

La Fig. 5 es un modelo no lineal aproximado del sistema de regulación de velocidad de una turbina hidráulica.

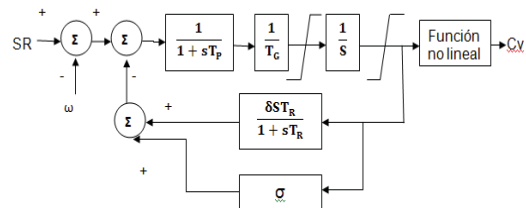


Fig. 5 Modelo no lineal aproximado del sistema de regulación de velocidad

El regulador de velocidad es influenciado por los efectos de la inercia del agua y el amortiguamiento realimentado.

La Fig. 6 muestra uno de los modelos matemáticos de hidroturbina más usados para análisis de sistemas, donde Tw es la constante del agua y los otros coeficientes son asociados a la turbina.

$$P_{Gv} \rightarrow \frac{a_{23} - (a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23})sT_w}{1 + a_{11}sT_w} \rightarrow P_M$$

Fig. 6 Modelo turbina no ideal

**C. Regulador de Voltaje**

La función principal de un sistema de excitación es proveer corriente continua al devanado de campo de la máquina sincrónica. El sistema de excitación debe contribuir al control del voltaje, control de flujo de potencia reactiva y al mejoramiento de la estabilidad transitoria del sistema respondiendo rápidamente ante perturbaciones.

En el diagrama de bloques de la Fig. 7 se puede observar los diferentes subsistemas de excitación del generador. Este incluye transductor de voltaje terminal y un compensador de carga, un regulador de voltaje, una

excitatriz, elementos estabilizadores del sistema de excitación, y un estabilizador de sistema de potencia.

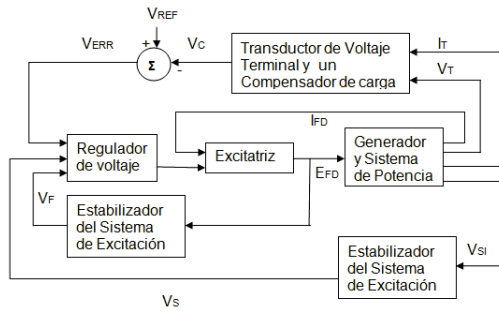


Fig. 7 Diagrama de bloque del sistema de excitación del generador

Tres tipos distintos de sistemas de excitación son identificados en base a la fuente de potencia de excitación.

- Tipo DC
- Tipo AC
- Tipo ST

Los reguladores de voltaje DC utilizan un generador de corriente continua con un conmutador, como la fuente de excitación del sistema de potencia, no son muy utilizados.

Los reguladores AC usan un alternador y rectificadores estacionarios o rotativos, para producir la corriente continua que necesita el campo generador.

Los reguladores Estáticos son sistemas que utilizan un transformador para convertir el voltaje (y también corriente en sistemas compuestos) a un nivel apropiado. Rectificadores, ya sean controlados o no controlados, proporcionan la corriente continua necesaria para el campo del generador.

D. Estabilizador de Sistemas de Potencia

Los PSS son utilizados en generadores ubicados estratégicamente para evitar oscilaciones en el sistema eléctrico.

La implementación de un PSS es una de las mejores alternativas al ser más eficiente y económico, pueden superarse los problemas de inestabilidad oscilatoria electromecánica permanente.

La función principal del PSS es extender los límites de estabilidad controlando la excitación del generador para amortiguar las oscilaciones de los rotores de las máquinas sincrónicas. Para dar amortiguamiento el PSS produce una componente del torque eléctrico en el rotor en fase con las variaciones de velocidad.

Las variables de entrada comúnmente utilizadas son la velocidad del eje, la frecuencia terminal y la potencia, y el

ajuste de los parámetros es usualmente realizado cuando se realiza estabilidad transitoria de pequeña señal.

III. PROYECTO HIDOELÉCTRICO MANDURIACU

Para tener una complementariedad entre las vertientes del Pacífico y la del Amazonas, y de esta manera aprovechar el potencial hídrico distribuido en todo el Ecuador, se impulsaron proyectos en el río Guayllabamba, como es el caso del proyecto hidroeléctrico Manduriacu.

El proyecto hidroeléctrico Manduriacu está ubicado en las parroquias Pacto y García Moreno de los cantones Quito y Cotacachi de las provincias de Pichincha e Imbabura respectivamente.

La central hidroeléctrica Manduriacu aportará aproximadamente 356 GWh al año con una potencia de 60 MW por medio de 2 unidades y su nivel de operación inicial será de 69 kV, como se muestra en la Fig. 8.

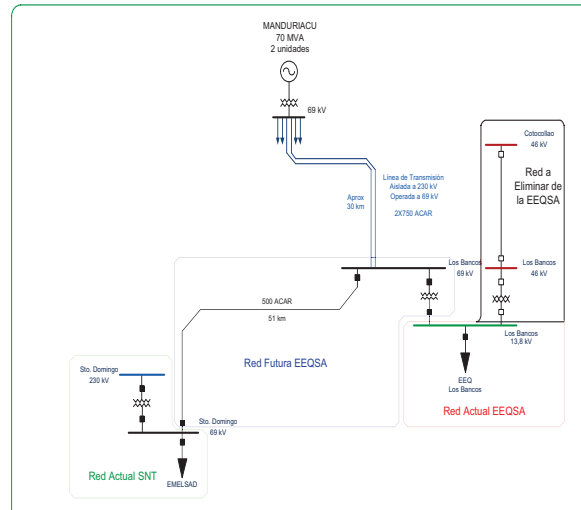


Fig. 8 Descripción de la central hidroeléctrica Manduriacu para el año 2015

A. Regulador de Velocidad

En la Fig. 9 se muestra el modelo compuesto IIEEG3, que representa a una turbina hidráulica con regulador de velocidad de manera conjunta.

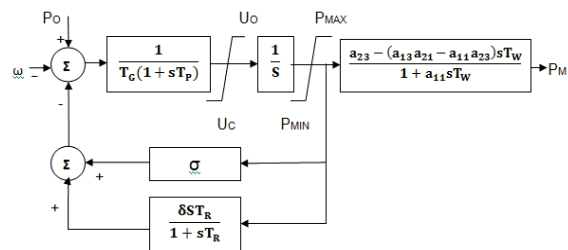


Fig. 9 Diagrama de bloque del regulador de velocidad y turbina hidráulica IIEEG3

La turbina asumida usa el flujo de agua en la tubería de presión como ondas viajeras. El regulador permite tomar en cuenta el estatismo permanente y transitorio así como las constantes de tiempo de válvula piloto y servomotor de compuerta.

B. Regulador de Voltaje

El modelo computarizado de la Excitatriz Rectificador de Potencia de Fuente Controlada Tipo ST1, mostrado en la Fig. 10 representa a los sistemas en que la excitación de potencia es suministrada a través de un transformador desde los terminales del generador y es regulada por medio de rectificadores controlados.

El máximo voltaje de la excitatriz disponible de estos sistemas es directamente relacionado al voltaje terminal del generador.

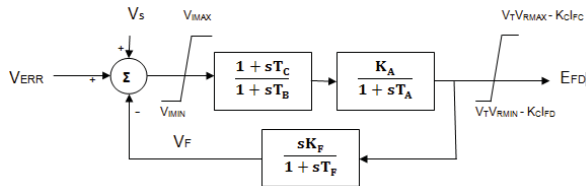


Fig. 10 Excitatriz rectificador de potencia de fuente controlada Tipo ST1

C. Estabilizador de Sistemas de Potencia

En la Fig. 11 se muestra el diagrama de bloques del PSS2A, que representa a un estabilizador de potencia acelerante, dispositivo ampliamente utilizado.

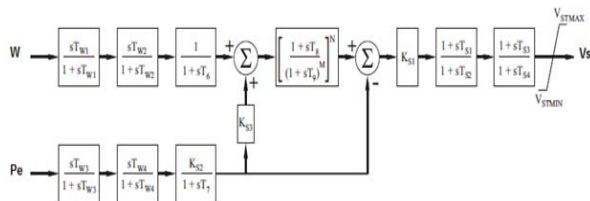


Fig. 11 Diagrama de bloque Estabilizador de sistemas de potencia PSS2A

IV. ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

Se analiza el comportamiento de estabilidad transitoria del SNI al ingreso del futuro Proyecto Hidroeléctrico Manduriacu considerando los lineamientos generales del Plan Maestro de Electrificación del Ecuador 2012 – 2021 y la simulación del SNI en función de las condiciones hidrológicas seca y lluviosa para los escenarios de demanda máxima y mínima, para el año 2015.

En el resumen realizado se presentan los casos más críticos, los cuales se dieron en los escenarios de demanda máxima.

A. Condiciones iniciales

En las Tablas I a III se presenta el resumen de los despachos, perfiles de voltaje y distribución de los flujos de potencia en la central Hidroeléctrica Manduriacu y en su zona de influencia.

TABLA I  
DESPACHO DEL SHIG 2015-SECO MÁXIMO

UNIDAD	Potencia Activa	Potencia Reactiva	Potencia Aparente	Máquinas en Paralelo.	Potencia Aparente Nominal	V, Magnitud	Factor de Potencia
	MW	MVar	MVA			p.u.	
U1 Manduriacu	30	3,495866	30,203	1	36	1,02	0,9932789
U2 Manduriacu	30	3,495866	30,203	1	36	1,02	0,9932789

TABLA II  
VOLTAJES EN BARRAS DEL SHIG Y ZONA DE INFLUENCIA 2015-SECO MÁXIMO

BARRAS	V, Magnitud	V, Magnitud	θ, Ángulo
	kV	p.u.	deg
B_LOS_BANCOS_69	71,08492	1,03021	14,80643
B_MANDURIACU_69	71,81524	1,0408	18,29637
B_SDM_69	68,43813	0,99185	0,39958
B_SDM_138	138,9105	1,00659	1,35608
B_ESM_138	143,1647	1,03604	6,94452
B_PMQ_230	228,222	0,99226	-7,7752

TABLA III  
FLUJOS POTENCIA Y CARGABILIDAD EN EL SHIG Y ZONA DE INFLUENCIA 2015-SECO MÁXIMO

LÍNEAS	Corriente Nominal	x'	Nivel de Carga	Carga Capacitiva	Pérdidas (Totales)
	kA	Ohm/km	%	MVar	MW
L_LOS_BANCOS_MAND_1	1,45	0,34855	16,69035	0,7148013	0,2173049
L_SDM_LOS_BANCOS	0,619	0,44321	70,33794	0,1845538	3,569602
L_SDM_ESM_1_1	0,47485	0,49582	21,99461	10,34699	0,7961011
L_SDM_QVD_2_1	0,88611	0,47266	8,531217	20,02328	0,087654
L_ING_PMQ_2_1	1,3	0,34863	10,20563	8,678761	0,0751776

B. Análisis de resultados

Para este análisis se aplican las normas de calidad, confiabilidad y seguridad definidos en la regulación del CONELEC No,006/2000 correspondiente a los Procedimientos de Despacho y Operación, que hacen referencia a los criterios aplicables a los análisis de estado estacionario.

Para el presente resumen se presentan los casos más críticos, tanto para salida de carga como para salida de generación.

1) Pérdida de carga en Santo Domingo, f.p. 0,96 inductivo

Se registran variaciones del flujo de potencia que alcanzan un máximo temporal de 28,762 MW en el circuito 1 de la Pomasqui – Jamondino de 230 kV y una frecuencia máxima de 60,086 Hz, al desconectar carga de 98,62 MW en el escenario lluvioso demanda máxima, el

cual no afecta el comportamiento dinámico del sistema, como se muestra en las Figs 12 y 13.

Mientras que las unidades de Manduriacu adquieren un máximo temporal en el ángulo de rotor de 60,811° y una velocidad máxima de 1,002 p.u., cuando se pierde 98,62 MW en el escenario lluvioso demanda máxima, como se muestra en las Figs 14 y 15.

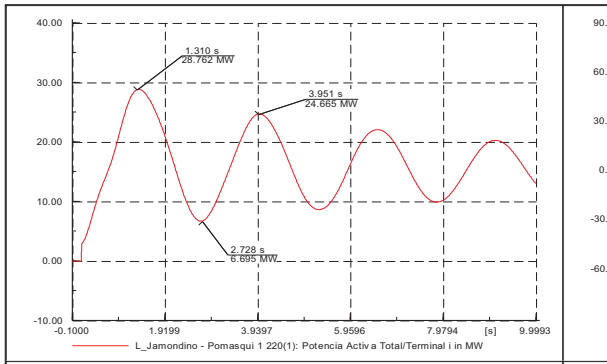


Fig. 12 Flujos de potencia para pérdida de carga en Santo Domingo de 98,62 MW, escenario lluvioso demanda máxima

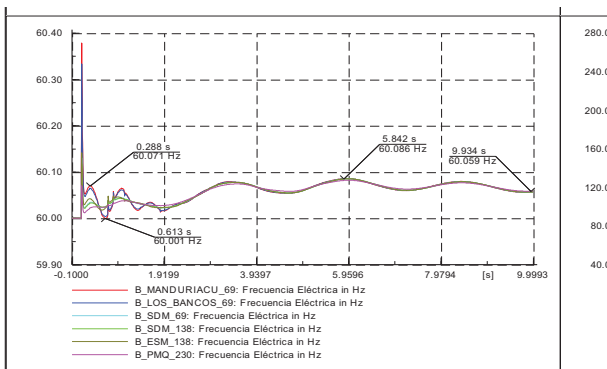


Fig. 13, Frecuencias para pérdida de carga en Santo Domingo de 98,62 MW, escenario lluvioso demanda máxima

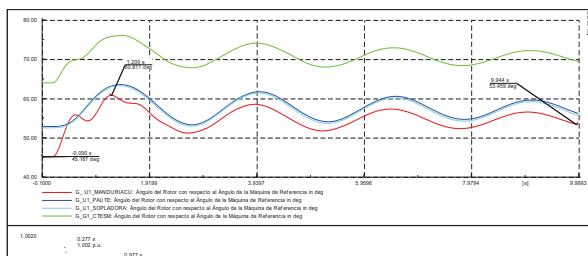


Fig. 14 Ángulos de rotor para pérdida de carga en Santo Domingo de 98,62 MW, escenario lluvioso demanda máxima

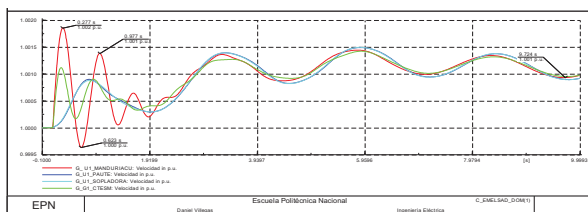


Fig. 15 Velocidades para pérdida de carga en Santo Domingo de 98,62 MW, escenario lluvioso demanda máxima

V. CONCLUSIONES

- Los estudios de estabilidad permiten analizar el comportamiento de las unidades de la Central Hidroeléctrica Manduriacu cuando el SNI es sometido a perturbaciones como las desconexiones súbitas de carga y generación para los diferentes escenarios.
- La Central Hidroeléctrica Manduriacu representa un aporte de generación de potencia activa y soporte de voltaje para que el SNI sea más robusto y de esta manera disminuir la transferencia de energía eléctrica desde Colombia a Ecuador.
- La determinación de las zonas seguras de operación para el modelamiento de la máquina síncrona de la Central Hidroeléctrica Manduriacu permite establecer límites máximos y mínimos de operación del grupo turbina – generador sin afectar su rendimiento ni su vida útil.
- En la realización de estudios de estabilidad transitoria se debe tomar en cuenta los sistemas control (regulador de excitación y de velocidad, y estabilizador de potencia), los cuales deben estar ajustados de tal manera que la respuesta del grupo turbina – generador satisfaga criterios normalizados en condiciones normales y de emergencia.
- Se puede ver que las oscilaciones de potencia activa en el tiempo de 10 s debido a los parámetros sintonizados en los sistemas de control de la Central Hidroeléctrica Manduriacu se amortiguan rápidamente en la línea de transmisión Los Bancos – Manduriacu y en las líneas de transmisión de las zonas de influencia del proyecto.
- Los voltajes de barra en todos los casos analizados del SNI se encuentran dentro del rango del +/- 5 % del voltaje nominal para 69 kV, 138 kV y 230 kV, cumpliendo con la normativa ecuatoriana.
- El máximo flujo de potencia activa en la línea de transmisión Jamondino - Pomasqui es de 46,41 MW cuando ocurre la salida de generación en la Central Hidroeléctrica Toachi Pilatón de 89 MW en el escenario seco demanda máxima.
- El valor de la frecuencia en los casos de estudio analizados no superó el rango de 57,5 Hz a 62 Hz, cumpliendo con la normativa ecuatoriana.
- Al realizar las simulaciones de salida de carga y generación en los casos de estudio se establecieron valores máximos y mínimos de las velocidades que adquieren las unidades de la Central Manduriacu, donde se observó que no hubo variaciones significativas, teniendo el máximo valor de 1,002 p.u. cuando existe una pérdida de carga de 98,62 MW en Santo Domingo.
- Al realizar las simulaciones de salida de carga y generación en los casos de estudio se establecieron las máximas variaciones de ángulo de rotor que adquieren



las unidades de la Central Manduriacu, donde se observó que el transitorio máximo de ángulo es de  $60,811^\circ$  cuando ocurre la salida de carga de 98,62 MW en Santo Domingo en el escenario lluvioso demanda máxima.

- Se puede observar que en ninguno de los casos analizados se presenta inestabilidad en el sistema ya que tanto el regulador de velocidad como de voltaje responden de una manera adecuada.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el soporte técnico de la Empresa Pública HIDROEQUINOCCIO EP.

## REFERENCIAS

- [1] KUNDUR Prabha, Power System Stability and Control, McGraw - Hill, 1994.
- [2] VAN CUTSEM Thierry, VOURNAS Costas, Voltage Stability of Electric Power Systems, 1998
- [3] IEEE COMMITTEE REPORT, Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1981.
- [4] IEEE COMMITTEE REPORT, Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies, USA, February 1973
- [5] KIAMEH Philip, Power Generation Handbook, McGraw-Hill Professional, 1 edition, 2002.
- [6] WOOD Allen, WOLLENBERG Bruce, Power Generation, Operation and Control, John Wiley & Sons, second edition, 1996.
- [7] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION, Selecting Hydraulic Reaction Turbines, 1976.
- [8] MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION, Power System Stabilizer (PSS), 2001.
- [9] PLAN MAESTRO DE ELECTRIFICACION DEL ECUADOR 2012 - 2021
- [10] CENACE, "Base de datos de los componentes estáticos y dinámicos del S.N.I. ecuatoriano para el software Power Factory".

- [11] TRANSELECTRIC, "Base de datos de los componentes estáticos y dinámicos del S.N.I. para el software Power Factory".
- [12] <http://www.conelec.gob.ec/images/normativa/ProcedimientosDespacho.pdf>, última visita noviembre 2012.
- [13] <http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/88/1/an%C3%A1lisis%20de%20estabilidad%20transitoria.pdf>, última visita septiembre 2012.
- [14] <http://www.heq.com.ec/>, última visita enero 2013.
- [15] [http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/caa/caa\\_Addendum\\_2003-107.pdf](http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/caa/caa_Addendum_2003-107.pdf), última visita enero 2013.

## BIOGRAFIAS



**Jesús Játiva Ibarra.-** Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional; Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor of Philosophy Ph.D. (1991) de la Universidad de Texas en Arlington Estados Unidos de América. Cursos de posgrado en Energy Conservation in Industry realizado en Suecia en 1995 y en Development Planning Techniques with Computer Applications efectuado en los Países Bajos en 1998. Profesor Titular de la Escuela Politécnica Nacional y Consultor de Sistemas Eléctricos de Potencia.



**Daniel A. Villegas T.**  
Nació en Quito, Ecuador, en 1987. Se graduó de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en marzo de 2013.