VOLUME 2

N° 1
MAY

ISSN : 2600-5573

Journal Ideas

2020

2020

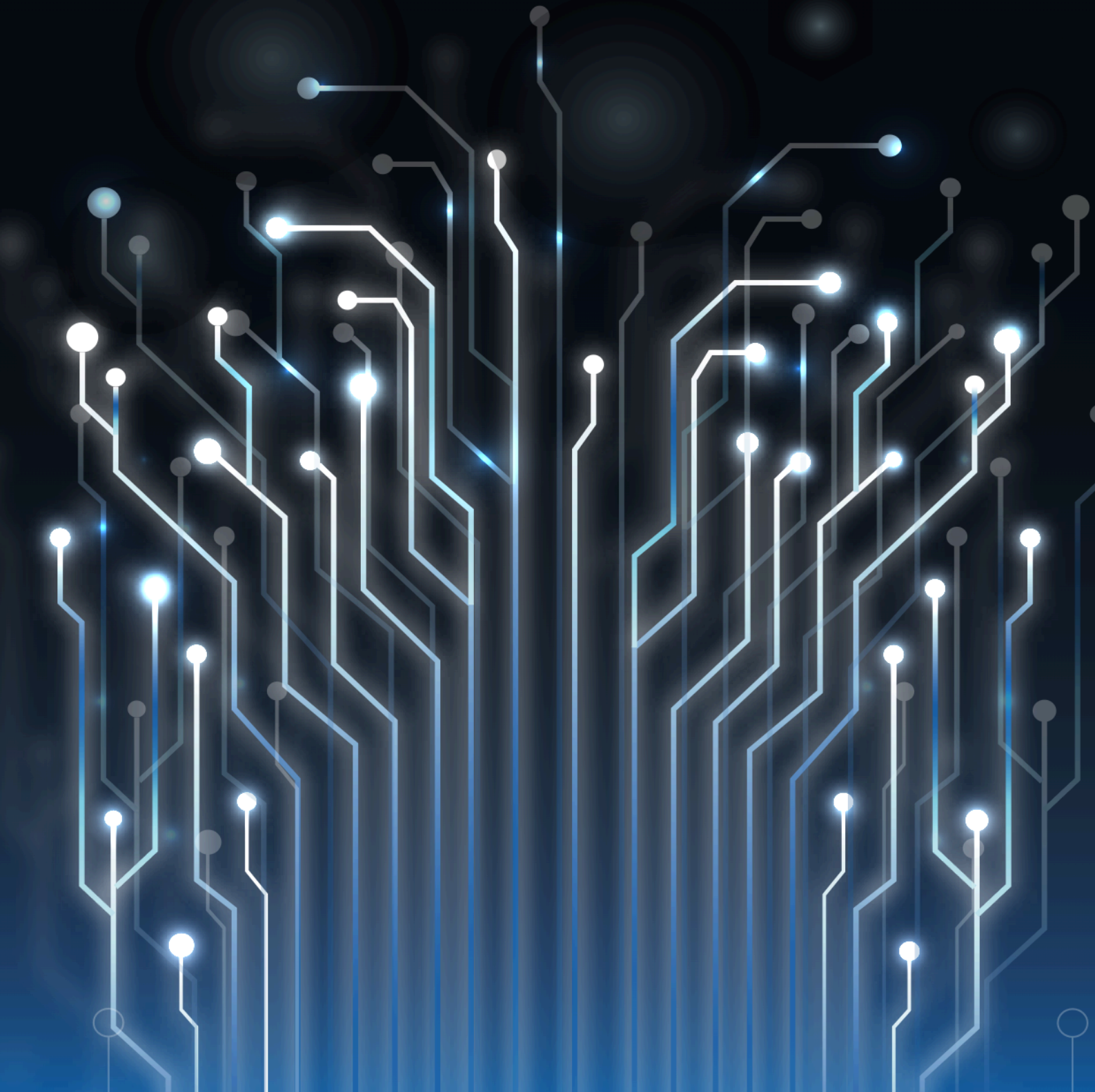
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

FICA

INNOVATION & DEVELOPMENT IN
ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

FICA





JOURNAL

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

IBARRA - ECUADOR

2020

FICA

Comité Editorial

Jorge Caraguay, MSc.
MANAGING DIRECTOR
e-mail: jacaraguay@utn.edu.ec

Daisy Imbaquingo, MSc.
GENERAL EDITOR
E-mail: deimbaquingo@utn.edu.ec

Marco Ciaccia, PhD.
SCIENTIFIC ADVISOR
E-mail: mciaccia@utn.edu.ec

Brizeida Gámez, PhD.
SCIENTIFIC ADVISOR
E-mail: bngamez@utn.edu.ec

Gerardo Collaguazo, PhD.
SCIENTIFIC ADVISOR
E-mail: gicollaguazo@utn.edu.ec

David Ojeda, PhD.
ACADEMIC EDITOR
E-mail: daojeda@utn.edu.ec

Fernando Ramírez, PhD.
ACADEMIC EDITOR
E-mail: frramirez@utn.edu.ec

Ana Cabrera, PhD.
ACADEMIC EDITOR
E-mail: akcabrera@utn.edu.ec

Marcelo Zambrano, Phd.
ACADEMIC EDITOR
E-mail: pdrosero@utn.edu.ec

Imprenta Universitaria 2020
Universidad Técnica del Norte
Ibarra-Ecuador

EDITORIAL UTN
IBARRA - ECUADOR

Cathy Guevara, MSc.
REVIEWERS PANEL
E-mail: cguevara@utn.edu.ec

Luz Tobar Subia, MSc.
REVIEWERS PANEL
E-mail: lmtobarsubia@utn.edu.ec

Leandro Lorente, MSc.
REVIEWERS PANEL
E-mail: lllorente@utn.edu.ec

REVIEWERS PANEL
E-mail: fjfierro@utn.edu.ec

Mario Ron, PhD.
REVIEWERS PANEL
E-mail: nbron@espe.edu.ec

Vladimir Bonilla Venegas, PhD
ASSOCIATED EDITOR
E-mail: fbonilla@ute.edu.ec

Thalia Daniela San Antonio Serrano, PhD
ASSOCIATED EDITOR
E-mail: tsanantonio@uta.edu.ec

Silvia Arciniega, Dra.
SECRETARY
E-mail: srarciniega@utn.edu.ec

Roger Mafla, Ing.
DIAGRAMMER DESIGNER & MAKING
E-mail: rfmaflaa@utn.edu.ec

Editorial

IDEAS as a mean of disseminating works with pertinence and scientific relevance, in the different areas of engineering research and applied sciences, continues to strengthen actions to advance the fulfillment of its objectives. This edition maintains the ethical and transparent commitment by selecting the articles through double-blind arbitration, as well as full commitment to the quality of scientific production, highlighting the effort made by national and international researchers who have placed their trust in this medium to make their results visible.

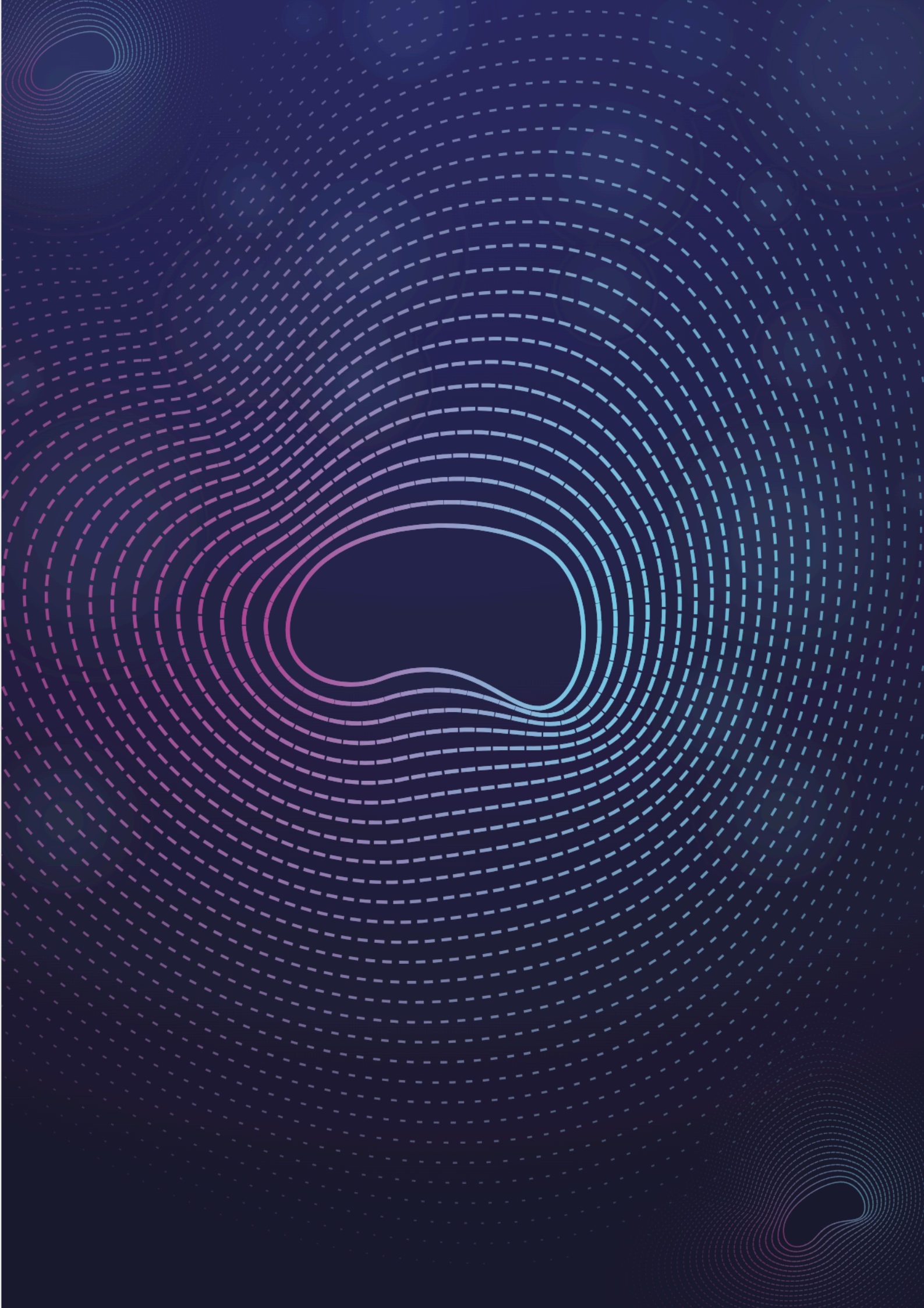
This third issue begins with an article presented by Andrade, Pozo y Gallardo, of the Escuela Politécnica Nacional, in which they show the transient stability assessment of a nine-bar power system, based on an analysis focused on the verification of the behavior of the fundamental units of this type of systems; as well as the implementation of a Flexible AC Transmission System (FACT) device, Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), to achieve stability control in the power flow.

Likewise, Cuazapaz, Rosero and Pazmiño, of the Sucre Instituto Tecnológico Superior, present the analysis of the planning and evaluation of electrical systems using the MODELS AC-OPF and DC-OPF and the Matpower and Matlab tools that allowed them to carry out a power flow analysis and a comparative study of results.

Enriquez and Rosero contribute, in this edition, carrying out the state of the art related to the technologies of modeling and simulation of continuous current systems of high voltage (HVDC). From this review, the researchers of the Universidad Politécnica Salesiana and Sucre Instituto Tecnológico Superior, describe the current trends of the methods used for the development of electrical studies involving the complex HVDC systems.

On the other hand, the researchers Higa, Naar and Ojeda from the Universidad Arturo Michelena (Venezuela) and Universidad EAFIT (Colombia), present the mechanical design of a hand prosthesis for people with a transcarpal amputation, considering the phases of 3D modeling, selection of the motor system and numerical validation of the model; obtaining a prosthesis with the ability to perform clamp tasks and movements at natural angles of the member.

We finish with the count of this edition with the contribution of Herrera, Vaca, Loor and Imbaquingo, from the Universitat Politècnica de València (Spain), Universidad Nacional de Educación and the Universidad Técnica del Norte. These researchers present a comparative study in control techniques applied to a ball and beam system. To do this, they used the state-feedback control, linear-quadratic regulatory (LQR) and neural network based NARMA control techniques, for discrete and continuous signals, conducting simulations using Matlab and Simulink, finding that the system under study can be stabilized by all controllers with slight differences.



Indice

Pag. 11

Evaluación de Estabilidad Transitoria en el Sistema de 9 Barras Considerando TCSC y Análisis de sincronismo y oscilaciones Subsíncrona

Geovany Andrade 1, Marcelo Pozo1, Carlos Gallardo1
1 Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador

23

Análisis de la planeación y evaluación de sistemas eléctricos mediante Matpower

Darwin Cuasapaz, Ricardo Rosero, Iván Pazmiño
SUCRE Instituto Tecnológico Superior, Quito-Ecuador

39

Una Revisión Acerca de Tecnologías y Modelación de Enlaces HVDC para Estudios Eléctricos

José Enriquez 1, Ricardo Rosero 2
1 Universidad Politécnica Salesiana, Maestría en electricidad Mención Sistemas Eléctrico en Potencia. Quito, (Ecuador); 2 SUCRE Instituto Tecnológico Superior, Carrera de Electricidad, Quito, Ecuador.

59

Prótesis de mano para personas con amputación transcarpiana

Javier Higa1, Alexander Naar1, Brizeida Ojeda2
1 Especialización en Mecatrónica, Universidad Arturo Michelena, San Diego, Estado Carabobo, Venezuela
2 Departamento de Ingeniería Mecánica, EAFIT, Medellín, Colombia

69

Controller comparison and mathematical modelling of ball and beam system

Erick P. Herrera-Granda1, Israel D. Herrera-Granda2, Alexis X. Vaca-Espinoza1, Jonathan G. Loor-Bautista3, Edgar F. Imbaquingo-Esparza1
1Escuela de Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial, Universidad Politécnica de Valencia, España
2Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
3Carreras de Profesionalización EB y EIB, Universidad Nacional de Educación, Orellana, Ecuador

87

Estado del Arte criterios de coordinación de protecciones en líneas de transmisión

Rosalía Revelo1, Ricardo Rosero2, Andrés Cuasapaz2
1 Universidad Politécnica Salesiana, Maestría en electricidad Mención Sistemas Eléctrico en Potencia. Quito, (Ecuador)
2 SUCRE Instituto Tecnológico Superior, Carrera de Electricidad, Quito, Ecuador.


26.Robot
Hexápodo 1

SCIENTIFIC

ARTICLES





Evaluación de Estabilidad Transitoria en el Sistema de 9 Barras Considerando TCSC y Análisis de sincronismo y oscilaciones Subsíncrona

Geovany Andrade [1], Marcelo Pozo1, Carlos Gallardo[1]
[1] Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional
Av. Ladrón de Guevara 253, Quito, Ecuador

[1]*{geovany.andrade, marcelo.pozo, carlos.gallardo}@epn.edu.ec*

RESUMEN

Este artículo presenta la evaluación de estabilidad transitoria de un sistema de potencia constituido por tres generadores y nueve barras. El análisis se centra en la verificación del comportamiento de las unidades fundamentales de este sistema voltajes, corrientes, potencias, ángulos del rotor de máquinas sincrónicas y velocidad angular, adicionalmente se implementa un FACT TCSC para lograr un control de la estabilidad en el flujo de potencia ante la presencia de perturbaciones de corto circuito.

Palabras Clave: Estabilidad Transitoria, Tiristor Controlado por Compensación en Serie TCSC..

Introducción

La estabilidad transitoria es la capacidad del sistema eléctrico para mantener el sincronismo cuando es sometido a una perturbación fuerte, por ejemplo, a una falta en la red de transporte, a una pérdida de generación o la pérdida de una cantidad importante de carga. El sistema eléctrico responde a una perturbación de estas características mediante grandes variaciones de los ángulos de los generadores síncronos y grandes oscilaciones de los flujos de potencia, de las tensiones y de otras variables del sistema. Si la separación angular entre generadores síncronos permanece acotada, entonces el sistema mantiene el sincronismo. En caso contrario pierde el sincronismo, lo cual suele hacerse evidente transcurridos 2 o 3 segundos desde la perturbación (Zheng, 2011), (Paserba, Miller, Larsen, & Piwko, 1995).

En consecuencia, los estudios de estabilidad suelen precisar el análisis de un número de casos elevado, para así poder abarcar las distintas perturbaciones de interés y los principales puntos de funcionamiento del sistema. El capacitor serie controlado por tiristores (TCSC) es un dispositivo FACTS que se utiliza como compensador serie. Es muy conocido que la transmisión de potencia de AC a través de grandes líneas de transmisión está limitada principalmente por la impedancia serie de la línea (Paserba et al., 1995), (Patel, 2018).

Con el desarrollo del TCSC (Figura 1), se ha logrado obtener una compensación variable, que ayuda a resolver problemas de estabilidad de voltaje, mejoramiento de la estabilidad transitoria, amortiguamiento de oscilaciones de potencia y el incremento del flujo de potencia a través de las líneas de transmisión (Meikandasivam, Nema, & Jain, 2011), (Liu & Wang, 2008), (Aguero, Cepeda, & Colome, 2014).

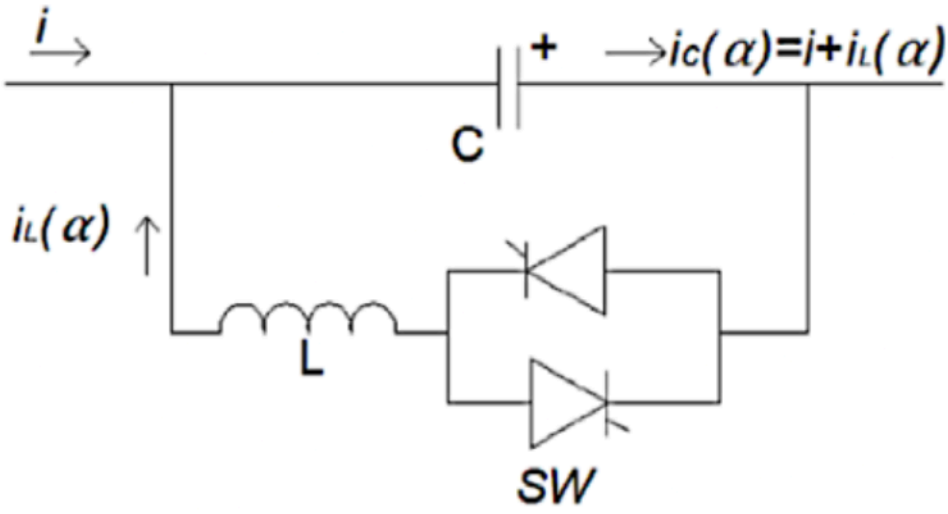


Figura 1. Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC)

La corriente del TCR es casi en su totalidad reactiva, atrasada 90° con respecto al voltaje. La componente activa de la corriente es muy pequeña y por lo tanto las pérdidas del dispositivo son despreciables; éstas se encuentran en el rango de 0.5 – 2% de la potencia reactiva (Meikandasivam et al., 2011), (Kumar, Balamurugan, & Janarthanan, 2018).

Conceptos generales

El FACT TSCS presenta diferentes modos de operación permitiendo controlar la reactancia del sistema, de esta forma brinda una apertura de estabilidad en el manejo de potencias activas o reactivas, a continuación, se detallan los modos.

- **Modo de Bloqueo (No Conducción)** En dicho modo los tiristores no conducen ya que no se generan pulsos de disparo para la compuerta, por lo cual el TCSC se comporta como un banco de condensadores serie fijo.

- **Modo de Conducción o Bypass**, En este modo se generan pulsos continuos de disparo para las compuertas de los tiristores, lo que permite que éstos conduzcan permanentemente durante el semiciclo de la onda de tensión en el condensador. La conducción continua de los tiristores hace que predomine el efecto del TCR (reactancia menor) sobre el del condensador, generándose un efecto neto de una pequeña reactancia inductiva. En este modo de operación la mayoría de la corriente de línea que circula a través del TCR.

- **Modo Vernier o Boost**, En este modo, las válvulas operan con un control en el ángulo de disparo y como consecuencia los tiristores conducen parcialmente durante un intervalo del ciclo de la onda de tensión. Por medio del control del ángulo de disparo, es posible controlar efectivamente la corriente fundamental que fluye a través de los tiristores (TCR). Dependiendo de la magnitud de dicha corriente, el TCSC puede presentar una reactancia aparente neta inductiva o capacitiva.

Sistema de Pruebas

El sistema de pruebas usado para el desarrollo del proyecto (Figura 2) es un sistema de pruebas estándar de la IEEE de nueve barras, el cual consta de tres generadores y tres cargas conectadas en las barras ocho cinco y seis.

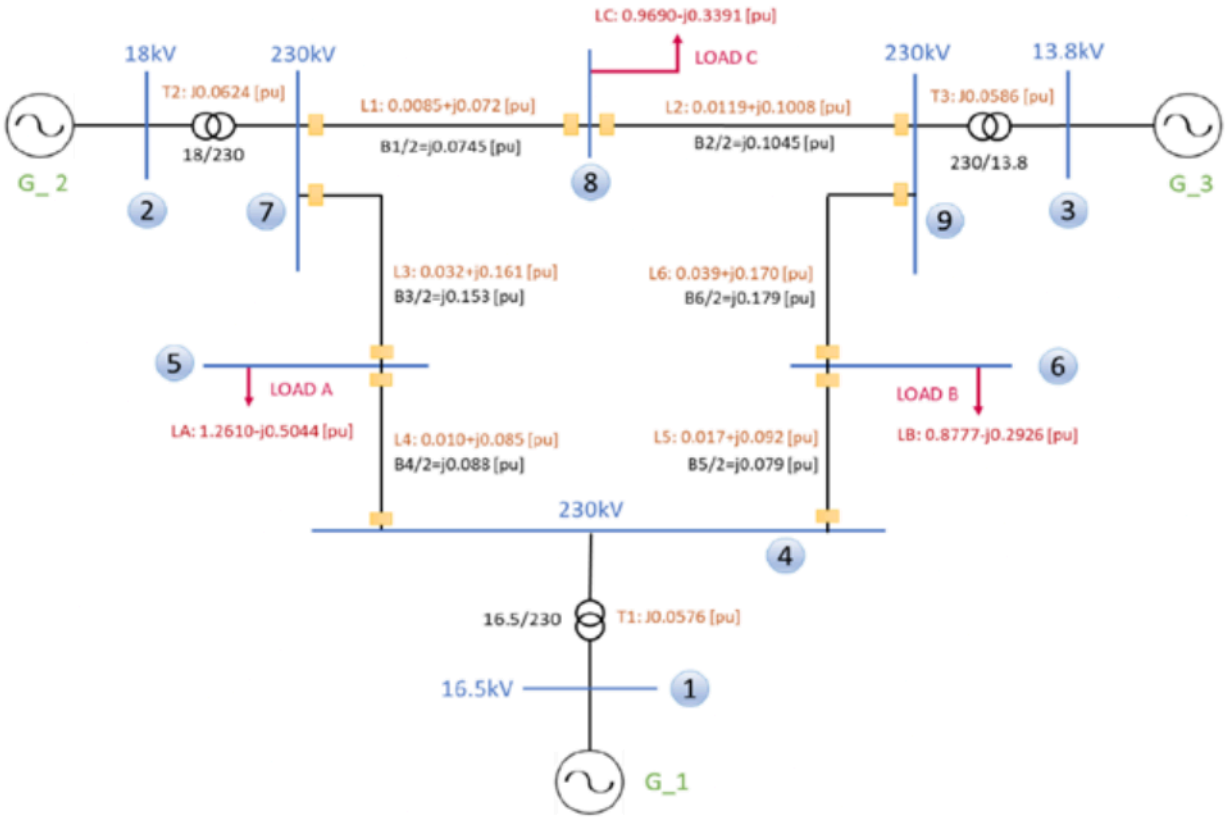


Figura 2. Sistema de prueba de 9 barras de IEEE

En la Tabla 1 se detallan las características de los tres generadores que se encuentran conectados en las barras uno, dos y tres del sistema de 9 barras respectivamente.

Tabla 1. Parámetros de los Generadores del sistema de 9 barras referidos a la base del sistema (100 MVA)

Generator	1	2	3
Rated MVA	247.5	192.0	128.0
kV	16.5	18.0	13.8
Power factor	1.0	0.85	0.85
Type	hydro	steam	steam
Speed	180 r/min	3600 r/min	3600 r/min
x_d	0.1460	0.8958	1.3125
x'_d	0.0608	0.1198	0.1813
x_q	0.0969	0.8645	1.2578
x'_q	0.0969	0.1969	0.25
x_l (leakage)	0.0336	0.0521	0.0742
τ'_{d0}	8.96	6.00	5.89
τ'_{q0}	0	0.535	0.600
Stored energy at rated speed	2364 MW·s	640 MW·s	301 MW·s

Flujo de Potencia

Previo al análisis de estabilidad transitoria se necesita obtener las condiciones iniciales del sistema, para lo cual es necesario correr un flujo de potencia para saber los voltajes y potencias en las barras del sistema de potencia.

En la Tabla 2 se puede apreciar el resultado del flujo de potencia corrido en el programa, donde estos resultados coinciden con los valores obtenidos en la simulación el Power Factory y los valores mostrados en el libro Base.

Tabla 2. Resultado del Flujo de Potencia Prefalla del sistema de 9 barras IEEE

Bus Data						
Bus #	Voltage Mag(pu)	Ang(deg)	Generation P (MW)	Q (MVAr)	Load P (MW)	Q (MVAr)
1	1.040	0.000*	71.64	27.05	-	-
2	1.025	9.280	163.00	6.65	-	-
3	1.025	4.665	85.00	-10.86	-	-
4	1.026	-2.217	-	-	-	-
5	0.996	-3.989	-	-	125.00	50.00
6	1.013	-3.687	-	-	90.00	30.00
7	1.026	3.720	-	-	-	-
8	1.016	0.728	-	-	100.00	35.00
9	1.032	1.967	-	-	-	-
		Total:	319.64	22.84	315.00	115.00

Cálculo de Y de barra

Para el cálculo de Estabilidad es necesario calcular las Y de barra reducidas, esto con el objetivo de calcular las potencias activas y reactivas de forma iterativa en el aplicativo de simulación. Previo al cálculo es necesario seguir el procedimiento descrito a continuación:

- Cálculo de las admitancias de las cargas en base al voltaje terminal y la potencia aparente consumida
- Sumar el valor de las reactancias de eje directo de los generadores a los transformadores de acople a la red de los respectivos generadores.
- Sumar la impedancia de las cargas a la de las líneas de transmisión correspondiente a la que se encuentre conectada la carga.
- Usar el procedimiento estándar para calcular la Y de barra.

Una vez realizado este procedimiento es necesario aplicar una metodología de reducción de nodos para facilitar el computo de los valores deseados, esta metodología se detalla en el libro base, donde en el presente documento solo se hace referencia a la ecuación final, (1), (2).

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rn} & Y_{rr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y_{red} = Y_{nn} - Y_{nr} \cdot Y_{rr}^{-1} \cdot Y_{rn} \quad (2)$$

Y reducida Prefalla

En la Tabla 3 se puede apreciar la Y de barra del sistema reducida a un equivalente de tres nodos, cabe resaltar que en esa Y de barra se encuentran incluidas las Admitancias de las cargas del sistema y que esos nodos representan la barra donde se encuentra el voltaje interno de los generadores.

Tabla 3. Y de barra del sistema de 9 barras reducido a un sistema de 3 nodos antes de que se produzca la barra.

	1	2	3
1	0.8455 - 2.9883i	0.2871 + 1.5129i	0.2096 + 1.2256i
2	0.2871 + 1.5129i	0.4200 - 2.7239i	0.2133 + 1.0879i
3	0.2096 + 1.2256i	0.2133 + 1.0879i	0.2770 - 2.3681i

Y de falla reducida

En la Tabla 4 se encuentra la Y de barra del sistema reducida a un sistema de tres barras, en la cual el usuario puede escoger en que nodo ha ocurrido la falla.

Esta matriz de admitancia será la que se usará para calcular las potencias, voltajes y ángulos de los generadores durante el transcurso de la falla previo a su despeje.

Para calcular esta Y de barra es necesario eliminar de la matriz original la fila y columna correspondiente a la barra fallada y encontrar la Y reducida de la nueva matriz original de dimensiones (8x8)

Tabla 4. Y de barra del sistema de 9 barras reducido a un sistema de 3 nodos antes cuando se ha producido un cortocircuito en las cercanías de la barra 7

	1	2	3
1	0.6568 - 3.8160i	0.0000 + 0.0000i	0.0701 + 0.6306i
2	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 5.4855i	0.0000 + 0.0000i
3	0.0701 + 0.6306i	0.0000 + 0.0000i	0.1740 - 2.7959i

Y reducida Posfalla

En la Tabla 5 se encuentra la Y de barra posfalla, la cual se calcula de manera similar a las dos anteriores, sin embargo, es necesario romper uno de los vínculos de esta para representar el despeje de la falla mediante la apertura de una línea, para lograr esto en la forma más práctica posible fue representar a línea abierta con una reactancia y resistencia de valor infinita.

Tabla 5. Y de barra del sistema de 9 barras reducido a un sistema de 3 nodos después de que se ha despejado la falla abriendo la conexión 5 -7

	1	2	3
1	1.1814 - 2.2288i	0.1376 + 0.7264i	0.1910 + 1.0794i
2	0.1376 + 0.7264i	0.3886 - 1.9526i	0.1988 + 1.2293i
3	0.1910 + 1.0794i	0.1988 + 1.2293i	0.2727 - 2.3423i

Para obtener las condiciones iniciales del sistema para el cálculo iterativo de valores fue necesario calcular de forma fasorial al voltaje interno de los generadores, para lo cual se usó ley de mallas de Kirchoff, la cual se puede resumir en:

$$\overline{Ef_i} = \overline{Vt_i} + j \cdot \left(\frac{P_{pre_i} + j \cdot Q_{pre_i}}{\overline{Vt_i}} \right)^* \cdot X'_d \qquad (3)$$

Del flujo de potencia realizado y del cálculo de los voltajes internos, se presenta en la Tabla 6 el resumen de todas las condiciones iniciales calculadas para el proceso iterativo usando la ecuación de oscilación y del controlador.

Tabla 6. Condiciones iniciales del sistema antes de producirse la falla

Ef_1	1.056|_2.27	Ef_2	1.0502|_19.	Ef_3	1.0170|_13.
Vt_1	1.040|_0	Vt_2	1.025|_9.3	Vt_3	1.025|_4.7
P_1	71.6 (W)	P_2	163 (W)	P_3	85 (W)
Q_1	27 (Var)	Q_2	6.7 (Var)	Q_3	−10.9 (Var)
ω_1	377 (rad /s)	ω_2	377 (rad /s)	ω_3	377 (rad /s)

Ecuación de Oscilación

Para la simulación del sistema, en donde se desea ver la evolución de los ángulos de potencia, velocidades angulares, y potencias eléctricas se usó la ecuación de oscilación descrita en la ecuación (4), la cual relaciona el comportamiento eléctrico y mecánico del generador, el cálculo para la potencia eléctrica de un sistema multimáquina se expresa en la ecuación (5).

$$\dot{\omega}_k = \frac{w_0}{2 \cdot H} \cdot \left(P_m - P_k - D \cdot \dot{\delta}_k\right) \quad (4)$$

$$P_k = (Ef_i)^2 \cdot G_{ii} + \sum_{j \neq i}^{n} Ef_i \cdot Ef_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos\left(\theta_{ij} - \delta_{i_k} + \delta_{j_k}\right) \quad (5)$$

$$\dot{\delta}_k = \omega_k - \omega_0 \quad (6)$$

Para poder encontrar los valores requeridos es necesario la resolución de las dos ecuaciones diferenciales antes descritas, donde se pueden aplicar métodos exactos o métodos aproximados (iterativos).

En el presente proyecto primero se empezó con el método de resolución por pasos de Euler, el cual se puede resumir en las ecuaciones (7), (8), (9) y (10), donde el estado siguiente se aproxima en función del estado actual y un paso hacia adelante usando como dirección la derivada actual del sistema.

$$\dot{\omega}_k = \frac{w_0}{2 \cdot H} \cdot \left(P_m - (Ef_i)^2 \cdot G_{ii} - \sum_{j \neq i}^{n} Ef_i \cdot Ef_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos\left(\theta_{ij} - \delta_{i_k} + \delta_{j_k}\right) - D \cdot \dot{\delta}_k\right) \quad (7)$$

$$\dot{\delta}_k = \omega_k - \omega_0 \quad (8)$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \Delta t \cdot \dot{\omega}_k \quad (9)$$

$$\delta_{k+1} = \delta_k + \Delta t \cdot \dot{\delta}_k \quad (10)$$

Implementación del TCSC

En el presente trabajo se implementó el FACT TCSC a la salida de los generadores para controlar la reactancia del SEP y poder estabilizar la potencia activa y por ende el voltaje terminal que es suministrado al sistema y Cargas.

En las ecuaciones (11), (12), (13), (14), (15) y (16) se puede ver el desarrollo de las ecuaciones del TCSC por el método de Euler, donde se necesitaron hacer cálculos adicionales para el error de la variación de la velocidad angular y la derivada de dicho error.

$$Ew_k = \Delta w_k - w_R = w_R - w_k \quad (11)$$

$$E\dot{w}_k = \Delta \dot{w}_{\square} - \Delta \dot{w}_{REF} = -\dot{w}_K \quad (12)$$

$$\dot{Lf}_k = \frac{K_a \cdot Ew_k + K_a \cdot T_c \cdot E\dot{w}_k - Lf_k \cdot (T_a + T_b) - X_k}{T_a \cdot T_b} \quad (13)$$

$$\dot{X}_k = Lf_k \quad (14)$$

$$Lf_{k+1} = Lf_k + \Delta t \cdot \dot{Lf}_k \quad (15)$$

$$X_{k+1} = X_k + \Delta t \cdot \dot{X}_k \quad (16)$$

Resultados con TCSC

Para la evaluación de estabilidad se ejecutó los siguientes paso:

- Antes de iniciar la simulación se inicializaron todas las variables eléctricas del generador.
- Se corrió un cortocircuito muy cerca de la barra 7 en la línea de conexión 5 – 7. (Para caso práctico se calculó la Y de falla considerando que fue en la barra 7)
- Después de cinco ciclos transcurridos la falla (0.083 segundos) se despejo la falla abriendo la línea de conexión 5 – 7
- El sistema se simuló durante 120 ciclos (dos segundos) para evaluar la evaluación de los ángulos de potencia de los generadores.

Mientras que para la sintonización de las constantes del TCSC se tomaron los valores referenciales del paper "TCSC for line power scheduling and system oscillation damping (Martins, Pinto, & Paserba, 2000), para la simulación se utiliza la herramienta computacional Python (Tabla 7)

TABLA 7. Constantes del AVR después de la sintonización

k_a	1
t_a	1 (s)
t_b	0.3 (s)
t_c	0.15 (s)

Para observar la diferencia del sistema con o sin TCSC, se muestran los resultados de ángulos de potencia (Figura 3 y Figura 4), de potencia activa (Figura 5 y Figura 6), y del voltaje terminal (Figura 7 y Figura 8)

Se puede apreciar los ángulos de potencia del sistema durante y después de la falla, donde se nota que la implementación del TCSC provoca que se afecte el torque sincronizante y provoca oscilaciones sostenidas en el tiempo. (tomando en cuenta el efecto amortiguante del generador). Esto ayuda a que el voltaje terminal permanezca cerca a 1 p.u y no oscilante como se muestra en la Figura 7.

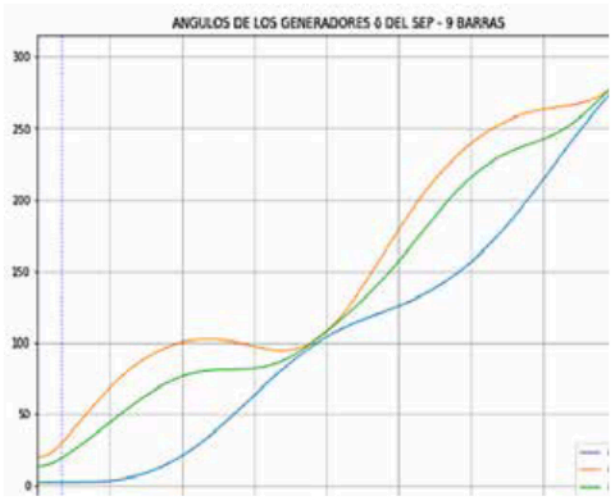


Figura. 3 Ángulos de Potencia sin presencia del TCSC

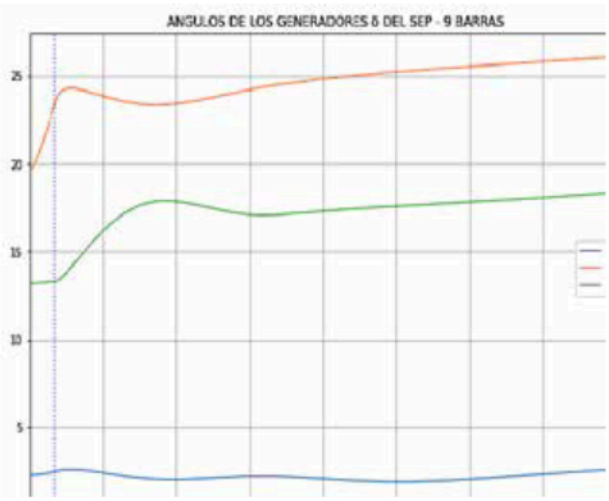


Figura 4. Ángulos del rotor con presencia del TCSC y Amortiguador

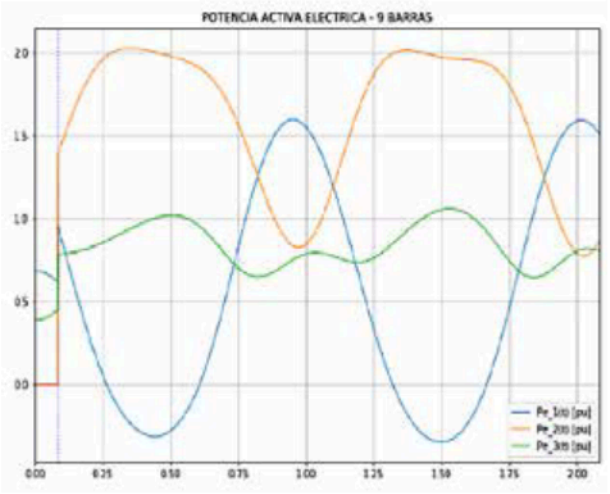


Figura 5. Potencias eléctricas activas sin presencia del TCSC

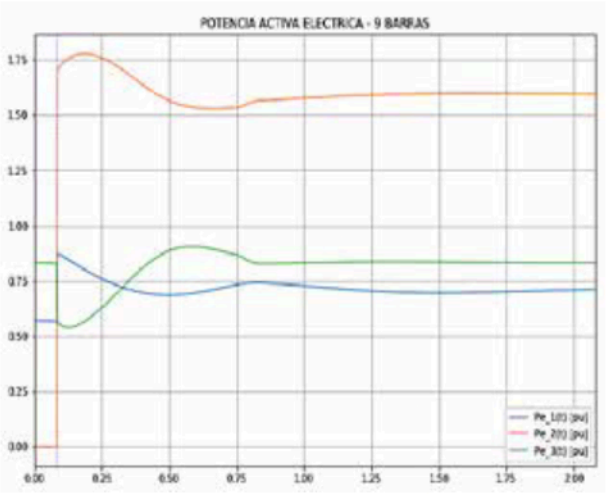


Figura 6. Potencia Eléctrica con TCSC y Amortiguador

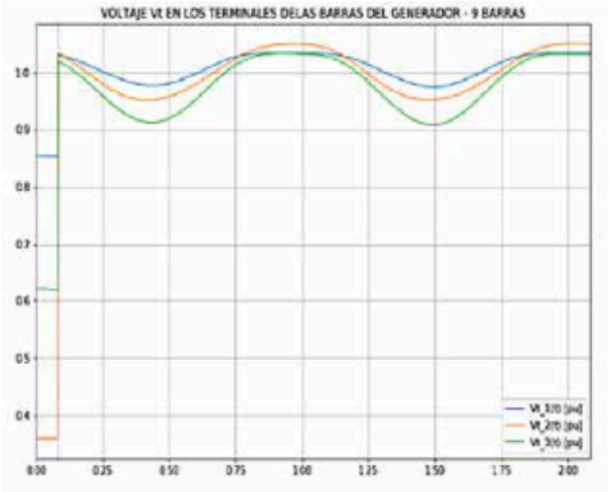


Figura 7. Voltaje Terminal en las Barras de los Generadores sin TCSC

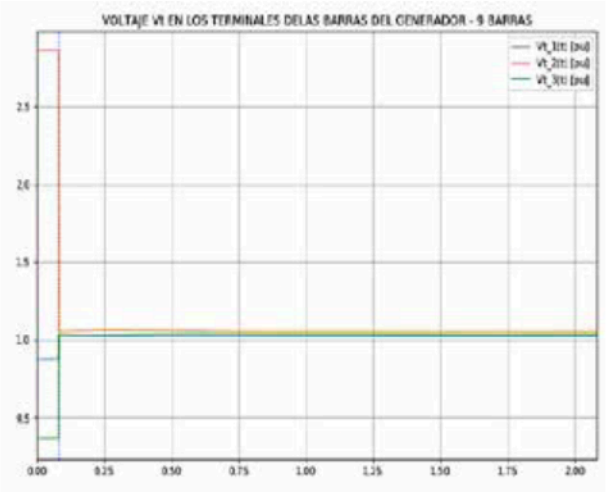


Figura 8. Voltaje Terminal con TCSC y Amortiguador

Conclusiones

Se ha implementado un aplicativo que permite visualizar y analizar la estabilidad transitoria de un sistema de 9 barras de la IEEE, donde se han implementado una interfaz gráfica para el despliegue de los resultados obtenidos y que permite el ingreso de las constantes de la simulación del sistema y de los controladores.

Cuando se probó el sistema sin el TCSC se pudo apreciar como el voltaje terminal de los generadores presenta oscilaciones mantenidas, así mismo al no incluir el amortiguamiento todavía en el análisis se ve como los ángulos son oscilatoriamente estables, esto debido a la presencia de torque sincronizante y a la falta de torque de amortiguamiento.

Cuando se implementó y sintonizó el TCSC se puede apreciar como el voltaje terminal de los generadores se estabiliza y no oscila en el tiempo gracias al controlador, sin embargo, los ángulos de potencia de los generadores empiezan a tornarse oscilatorios, por lo que si no se tiene un PSS se recomienda tener cuidado al sintonizar el TCSC y usar las oscilaciones angulares como una restricción del sintonizador.

Al ingresar el efecto amortiguante de los generadores se ve como todas las variables del generador pierden el efecto oscilatorio y se estabilizan en el tiempo, para el presente caso de estudio el tiempo de estabilización es de aproximadamente tres segundos.

Referencias

Aguero, E. D., Cepeda, J. C., & Colome, D. G. (2014). FACTS models for stability studies in DIgSILENT Power Factory. In 2014 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, PES T and D-LA 2014 - Conference Proceedings (Vol. 2014-October). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2014.6955182

Kumar, K. S., Balamurugan, S., & Janarthanan, N. (2018). Enhancement of TCSC characteristics. In 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies, ICICICT 2017 (Vol. 2018-January, pp. 1369–1372). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. https://doi.org/10.1109/ICICICT1.2017.8342769

Liu, Q., & Wang, Z. (2008). Research on the influence of TCSC to EHV transmission line protection. In 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008 (pp. 2258–2261). https://doi.org/10.1109/DRPT.2008.4523786

Martins, N., Pinto, H. J. C. P., & Paserba, J. J. (2000). Using a TCSC for line power scheduling and system oscillation damping - Small signal and transient stability studies. In 2000 IEEE Power Engineering Society, Conference Proceedings (Vol. 2, pp. 1455–1461). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850193

Meikandasivam, S., Nema, R. K., & Jain, S. K. (2011). Selection of TCSC parameters: Capacitor and inductor. In India International Conference on Power Electronics, IICPE 2010. https://doi.org/10.1109/IICPE.2011.5728104

Paserba, J. J., Miller, N. W., Larsen, E. V., & Piwko, R. J. (1995). A thyristor controlled series compensation model for power system stability analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 10(3), 1471–1478. https://doi.org/10.1109/61.400931

Patel, N. (2018). Hardware implementation and simulation of single phase TCSC at laboratory scale level. In 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017 (pp. 1755–1760). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389750

Zheng, T. Q. (2011). Application of feedback linearization strategy in voltage fault ride-through for photovoltaic inverters. In IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 4666–4671). IEEE. https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6120080

Análisis de la planeación y evaluación de sistemas eléctricos mediante Matpower

Darwin Cuasapaz, Ricardo Rosero, Iván Pazmiño
SUCRE Instituto Tecnológico Superior
Carrera de Electricidad Av. 10 de Agosto N26-27 y Luis Mosquera Narváez, Quito, Ecuador

dcuasapaz@tecnologicosucre.edu.ec, rrosero@tecnologicosucre.edu.ec, ipazmino@tecnologicosucre.edu.ec

RESUMEN

En el sector eléctrico, los participantes de mercado requieren tener la capacidad de optimizar los recursos de tal manera que los ofertantes y consumidores obtengan los mejores beneficios. Se realizará el análisis de un sistema eléctrico de 9 barras mediante flujo óptimo de potencia comparando los resultados de usar los modelos AC-OPF y DC-OPF. De esta manera se pretende observar las variaciones en costos marginales al usar los dos métodos. Considerando también los efectos de la congestión de las líneas de transmisión sobre los precios nodales y las rentas de congestión, así como la aparición de precios sombra. El estudio se realiza mediante el uso del software MATLAB junto con la herramienta MATPOWER que permiten la resolución del flujo óptimo de potencia.

Palabras Clave: Sistema eléctrico de potencia, flujo óptimo de potencia, costos marginales, rentas de congestión, MATPOWER.

Introducción

A mediados de la década de los ochenta, el sector eléctrico mundial viene experimentando una serie de cambios, motivados principalmente, por una necesidad de eficiencia en la producción de energía eléctrica. En gran parte del mundo, el principal cambio en el sector consiste en un paso gradual a las economías de mercado, lo que ha permitido la introducción de competencia en sectores como; la generación de energía, caracterizada por una creciente y activa participación del sector privado, esta participación requiere la optimización de los recursos usados en generación, transmisión y distribución, de tal manera, que los proveedores obtengan un beneficio [1], [2]. Uno de los métodos usados para la optimización de costos en el sector eléctrico es el flujo óptimo de potencia [3].

El Flujo óptimo de potencia es un problema de optimización no lineal usado para minimizar costos de generación y transmisión de un sistema de potencia que se encuentra sujeto a restricciones definidas por las leyes de Ohm y Kirchhoff [4].

Se pueden diferenciar dos enfoques principales para el flujo óptimo de potencia. El AC-OPF que se caracteriza porque constituye un problema de solución complejo como consecuencia de la característica no lineal de las ecuaciones de potencia. Debido a la complejidad del AC-DC es más usual el uso del DC-OPF que permite la relajación del problema ya que permite linealizar el modelo del sistema de potencia al considerarlo como un sistema de DC, de tal manera que las ecuaciones de flujo de potencia estándar consideran únicamente la potencia activa PG y los ángulos de voltaje □ en el vector de las variables de optimización.

La compensación de mercado utiliza DC-OPF (en el momento) en problemas muy grandes, estas aproximaciones en DC son más adecuadas para sistemas de transmisión (no distribución) [5].

El AC-OPF es utilizado principalmente para la optimización de acciones de operación y control a diferencia del DC-OPF las ecuaciones de flujo de energía de CA son completas, pero no convexas (en su forma original), por lo que no existe garantía de que encontrar el

óptimo global, considerándose intratable para sistemas muy grandes [6].

Es necesario que todo el conjunto de quipos e instalaciones que conforman un SEP sean gestionadas de forma eficiente y sistemática para maximizar el uso de los recursos energéticos y minimizar los costos de operación [7].

Metodología

Para establecer los primeros parámetros de la investigación, es necesario establecer las fijaciones de precios de operación en mercados zonales y nodales, de esta forma; en los mercados spot europeos, los precios zonales son comúnmente utilizados para aliviar la congestión de la red zonal. El precio aplica una orden de mérito para enviar energía desde una ubicación a otra, los precios zonales dan un precio uniforme dentro de cada área de precios, sin embargo, no proporciona suficientes señales de precios a los participantes del mercado con respecto a la escasa capacidad de transmisión, cabe señalar que independientemente del área de precio es decir nodal o zonal se busca maximizar el beneficio social [3].

La fijación de precios nodales, da el valor óptimo para cada ubicación y produce flujos viables dentro de la red, y se considera que da señales de mercado más claras [5].

Las áreas de precios nodales están limitadas por las ecuaciones 1 y 2

$$q_i{}^5 - q_i{}^d = \sum_{j:(i,j)\in L} f_{ij} - \sum_{j:(j,i)\in L} f_{ji}, \forall i \in N$$

$$-CAP_{ji} \leq f_{ij} \leq CAP_{ij}, \forall i,j \in N^{Nodal}$$

El Precio Sombra se refiere a una tasa de cambio del valor óptimo ante una modificación marginal del lado derecho de una restricción, entendiendo como marginal una modificación que permita mantener las actuales restricciones activas para el problema (se conserva la base óptima).

Para el análisis se utilizará el Sistema IEEE de 9 barras y 3 generadores. Las barras 5, 7 y 9 se toman como nodos pilotos, mientras que las 1, 2 y 3 son de control, para la obtención de resultados se utilizó Matpower y Matlab como software de análisis.

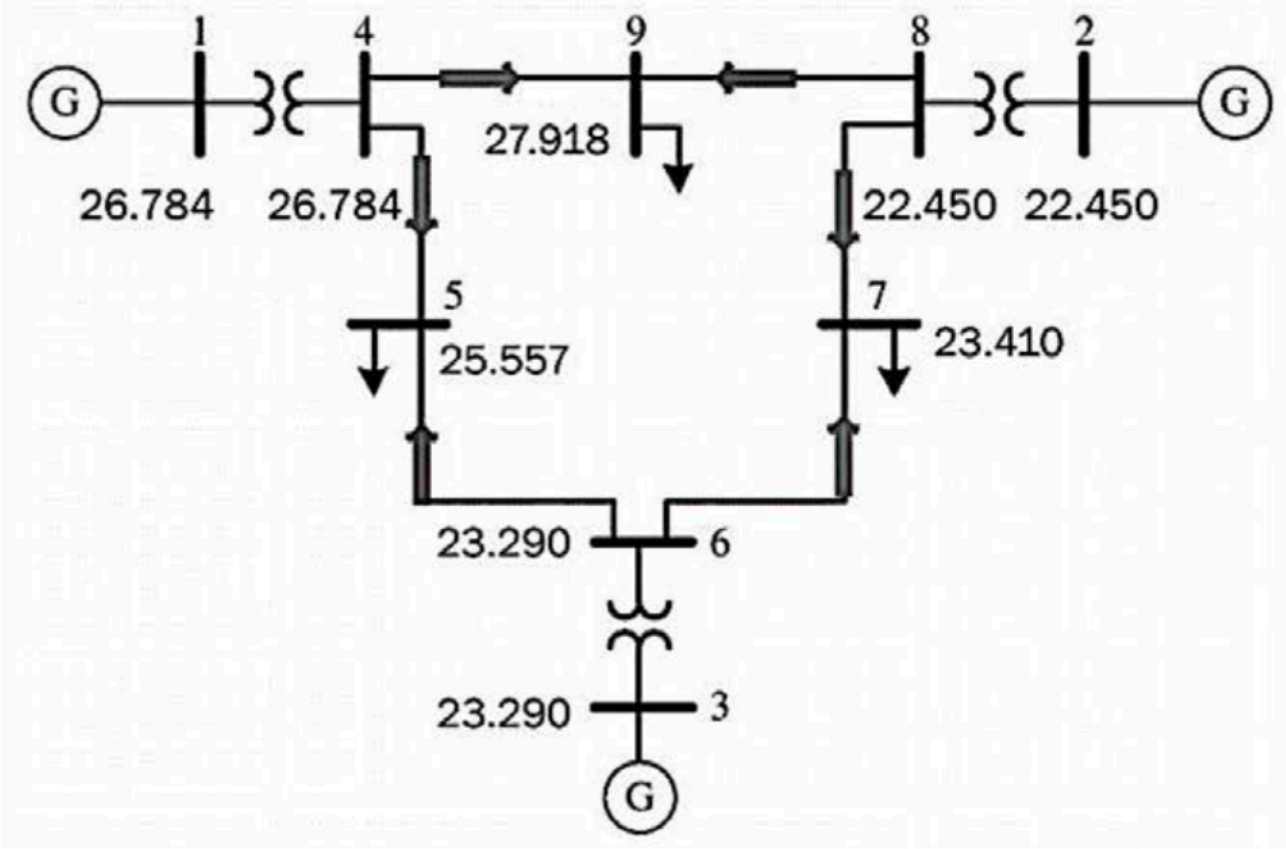


Fig.1. Sistema de prueba IEEE 9 barras. Fuente: IEEE

Las características que posee el sistema de prueba IEEE de nueve barras son mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Características IEEE 9 barras.

Nombre	Tipo	PG MW	Qc MVAR	PC MW	QC MVAR	V (p.u)	□
Barra 1	V□	-	-	0	0	1.050	0
Barra 2	PV	163	-	0	0	1.025	-
Barra 3	PV	85	-	0	0	1.025	-
Barra 4	PQ	0	0	0	0	-	-
Barra 5	PQ	0	0	125	50	-	-
Barra 6	PQ	0	0	90	30	-	-
Barra 7	PQ	0	0	0	0	-	-
Barra 8	PQ	0	0	100	35	-	-
Barra 9	PQ	0	0	0	0	-	-

Fuente: IEEE

De esta forma se presenta la comparación de los flujos de potencia DC y AC bajo el siguiente criterio.

El Flujo DC es un simple modelo lineal para la potencia activa, también se desearía tener lo mismo para la potencia reactiva, la cual; está determinada fuertemente por la magnitud de los voltajes de las barras. Al usar este método, se asume que el voltaje en todas las barras es 1[pu] con lo que no existe inyección de potencia reactiva, en cuanto a las pérdidas, no se las considera por lo que se presenta un valor de cero.

En cuanto al Flujo AC; es un modelo que usa la potencia activa y reactiva para encontrar la solución en todas las barras, además, considera las pérdidas, en este caso los voltajes en las barras ya no son 1[pu], por lo cual, van a variar sus magnitudes hasta encontrar una solución y de acuerdo con las tolerancias la solución propuesta puede ser o no considerada.

De esta forma, se muestra en la tabla 2 el flujo obtenido en DC mientras que en la tabla 3 se presenta el flujo determinado en AC.

Tabla 2. Flujo en DC

Bus	Voltaje		Generación		Load	
#	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	0	86,56	0	-	-
2	1	6,04	134,38	0	-	-
3	1	4,003	94,06	0	-	-
4	1	-2,857	-	-	-	-
5	1	-4,635	-	-	90	0
6	1	0,845	-	-	-	-
7	1	-1,338	-	-	100	0
8	1	1,228	-	-	-	-
9	1	-5,43	-	-	125	0
Total:			315	0	315	0

Fuente: Autores

Tabla 3. Flujo en AC

Bus	Voltaje		Generación		Load	
#	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	0,000	89,8	12,94	-	-
2	1,097	4,4893	134,32	0,05	-	-
3	1,087	3,249	94,19	-22,62	-	-
4	1,094	-2,463	-	-	-	-
5	1,084	-3,982	-	-	90	30
6	1,	0,602	-	-	-	-
7	1, 089	-1,197	-	-	100	35
Total:			318	-9,63	315	115

Bus	Voltaje		Generación		Load	
#	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
8	1,	0,905	-	-	-	-
9	1,072	-4,616	-	-	125	50
Total:			318	-9,63	315	115

Fuente: Autores

De la misma forma, se presenta el análisis que relaciona el costo de despacho con el costo incremental con las pérdidas y el incremento del despacho. Así, la tabla 4 muestra los costos de despacho ante un flujo en DC con un costo total de 5216.03 $/h, mientras que la tabla 5 expone el análisis de los costos de despacho ante un flujo en AC obteniéndose un costo total de 5296.69 $/h.

Tabla 4. Flujo en DC costos de despacho

Bus	Generación		Load		Lambda ($/MVA-h)	
#	P(MW)	Q (MVAr)	P(MW)	Q (MVAr)	P	Q
1	86,56	0	-	-	24,044	-
2	134,38	0	-	-	24,044	-
3	94,06	0	-	-	24,044	-
4	-	-	-	-	24,044	-
5	-	-	90	0	24,044	-
6	-	-	-	-	24,044	-
7	-	-	100	0	24,044	-
8	-	-	-	-	24,044	-
9	-	0	125	0	24,044	-
Total:	**315**	**0**	**315**	**0**		**115**

Fuente: Autores

Tabla 5. Flujo en AC costos de despacho

Bus	Generación		Load		Lambda ($/MVA-h)	
#	P(MW)	Q (MVAr)	P(MW)	Q (MVAr)	P	Q
1	89,8	12,94	-	-	24,756	-
2	134,32	0,05	-	-	24,035	-
3	94,19	-22,62	-	-	24,076	-
4	-	-	-	-	24,756	0,004
5	-	-	90	30	24,998	0,027
6	-	-	-	-	24,076	-
7	-	-	100	35	24,254	0,036
8	-	-	-	-	24,035	-
Total:	**318,31**	**-9,63**	**315**	**115**		**115**

Bus	Generación		Load		Lambda ($/MVA-h)	
#	P(MW)	Q (MVAr)	P(MW)	Q (MVAr)	P	Q
9	-	-	125	50	24,999	0,112
Total:	**318,31**	**-9,63**	**315**	**115**		**115**

Fuente: Autores

Esta variación entre los costos de despacho se debe a que al considerar las perdidas en las líneas se debe aumentar la generación para que los voltajes sean adecuados en las cargas lo cual encarece el sistema. Como se indica en las tablas anteriores además aparecen los precios sombra que son valores ocultos dentro del despacho, también debemos considerar que las cargas necesitan de reactivos lo cual tiene un precio también.

Presentados estos datos, es necesario establecer una comparativa de los precios nodales en AC y DC de modo que; Cuando se tiene un flujo DC, el precio en cada nodo debe ser igual debido a que las pérdidas son nulas, mientras que; cuando se tiene un flujo en AC aparecen los precios sombra debido a las limitaciones de voltaje que encarecen el despacho del sistema, si se considera la congestión los precios nodales aumentan por la restricción de flujo en las líneas. Así, la comparativa de precios nodales con respecto a P se muestran en la figura 2.

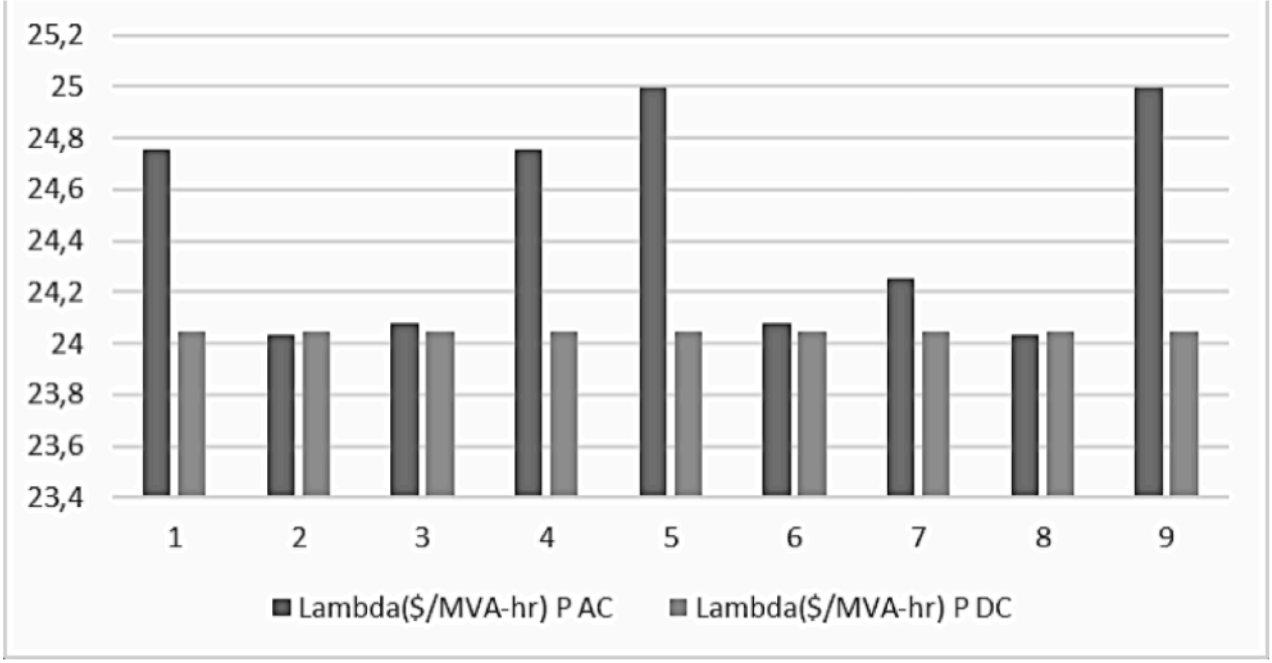


Fig. 2. Comparación de precios nodales con respecto a P. Fuente: Autores

En base a los resultados expuestos, es claramente apreciable que; en el caso de flujo DC los generadores en cada nodo poseen costos marginales relativamente en los mismos valores, e iguale a 24.044 $/MWh, mientras que en el flujo AC, el generador número dos es el más barato con un costo de 24.035 $/MWh.

Debido a esta deducción, se presenta en la tabla 6 y en la tabla 7 el flujo en DC y AC generador con el costo más barato, respectivamente.

Tabla 6. Flujo en DC generador con el costo más barato

Bus	Voltaje		Generación		Load		Lambda ($/MVA-hr)	
#	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P	Q
1	1	0	86,56	0	-	-	24,0	-
2	1	6,04	134,38	0	-	-	24,0	-
3	1	4,003	94,06	0	-	-	24,0	-

Fuente: Autores

Tabla 7. Flujo en AC generador con el costo más barato

Bus	Voltaje		Generación		Load		Lambda ($/MVA-hr)	
#	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P	Q
1	1,1	0	89,8	12,94	-	-	24,756	-
2	1,097	4,893	134,32	0,05	-	-	24,035	-
3	1,087	3,249	94,19	-22,62	-	-	24,076	-

Fuente: Autores

Establecido el generador más barato es necesario establecer las limitaciones potenciales de estos elementos, de esta manera, Los límites en la generación se utilizan para obtener restricciones comerciales entre diferentes áreas de precios. En la práctica, establecer límites adecuados de capacidad es complicado ya que los límites bajos no podrían utilizar completamente la capacidad de la red, a su vez; los altos pueden causar mucha congestión [3]. Una vez revisado el reporte generado mediante MathPower se observa (Ver tabla 1) que el costo de generación más barato corresponde al generador dos.

La obtención del precio sombra, tanto para DC como para AC se muestran mediante las tablas 8 y 9 respectivamente. Es necesario aclarar que el valor de la función objetivo para DC es 5216.03 $/hr mientras que para AC el valor de la función objetivo es 5296.69 $/hr.

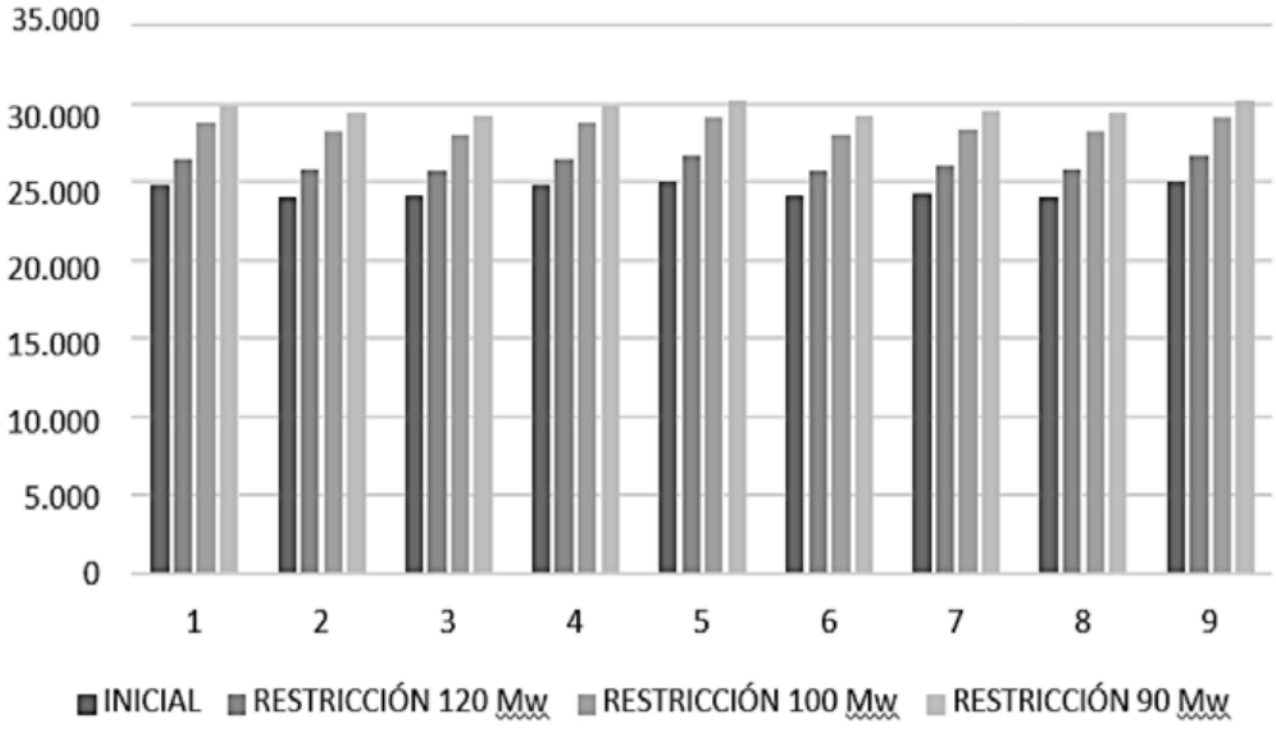
Tabla 8. Flujo en DC para cálculo del precio sombra

Bus	Voltaje		Generación		Load		Lambda ($/mva-hr)	
#	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P	Q
1	1,000	0.000	86,56	0	-	-	24,044	-
2	1,000	6.040	134,38	0	-	-	24,044	-
3	1,000	4.003	94,06	0	-	-	24,044	-
Total				0	315	0		

Bus	Voltaje		Generación		Load		Lambda ($/mva-hr)	
#	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P	Q
4	1,000	-2.857	-	-	-	-	24.044	-
5	1,000	-4.635	-	-	90	0	24.044	-
6	1,000	0.845	-	-	-	-	24.044	-
7	1,000	-1.338	-	-	100	0	24.044	-
8	1,000	1.228	-	-	-	-	24.044	-
9	1,000	-5.430	-	-	125	0	24.044	-
Total				0	315	0		

Fuente: Autores

Tabla 9. Flujo en DC para cálculo de precio sombra



Bus	Voltaje		Generación		Load		Lambda ($/mva-hr)	
#	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P	Q
1	1,100	0	89,8	12,94	-	-	24,756	-
2	1,097	4,893	134,32	0,05	-	-	24,035	-
3	1,087	3,249	94,19	-22,62	-	-	24,076	-
4	1,094	-2,463	-	-	-	-	24,756	-
5	1,084	-3,982	-	-	90	30	24,998	-
6	1,1	0,602	-	-	-	-	24,076	-
7	1,089	-1,197	-	-	10	35	24,254	-
8	1,1	0,905	-	-	-	-	24,035	-
9	1,072	-4,616	-	-	125	50	24,999	-
Total			318,31	-9,63	315	115		

Fuente: Autores

Resultados

De esta manera, los resultados obtenidos para el costo de generación de P en AC y en DC se muestran en las figuras 3 y 4 respectivamente.

Fig. 3. Costo de generación en AC.

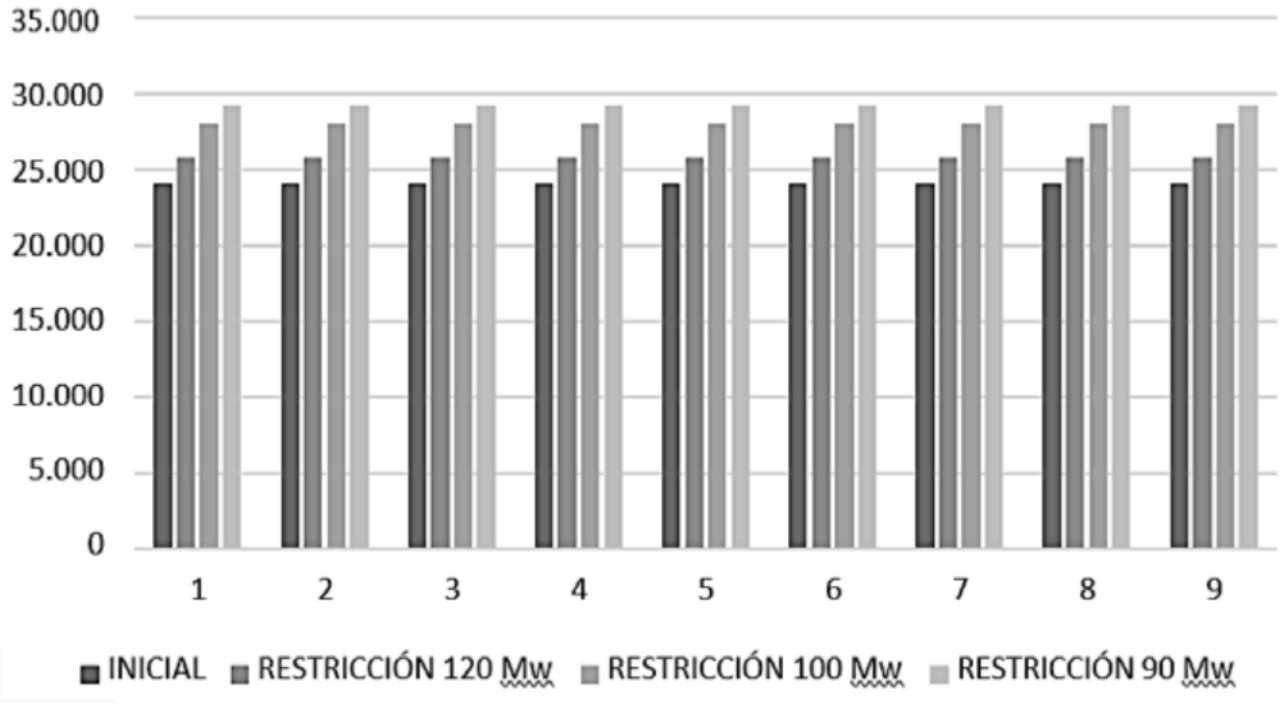


Fig. 4. Costo de generación en DC.

Para la obtención del precio sombra tomamos como referencia el valor de la función objetivo, en este caso; para AC 5296.69 $/hr mientras que para DC 5216.03 $/hr, posteriormente, restamos el valor de las funciones objetivo obtenidas previamente, una vez ingresadas las restricciones, los resultados se observan en la figura 5.

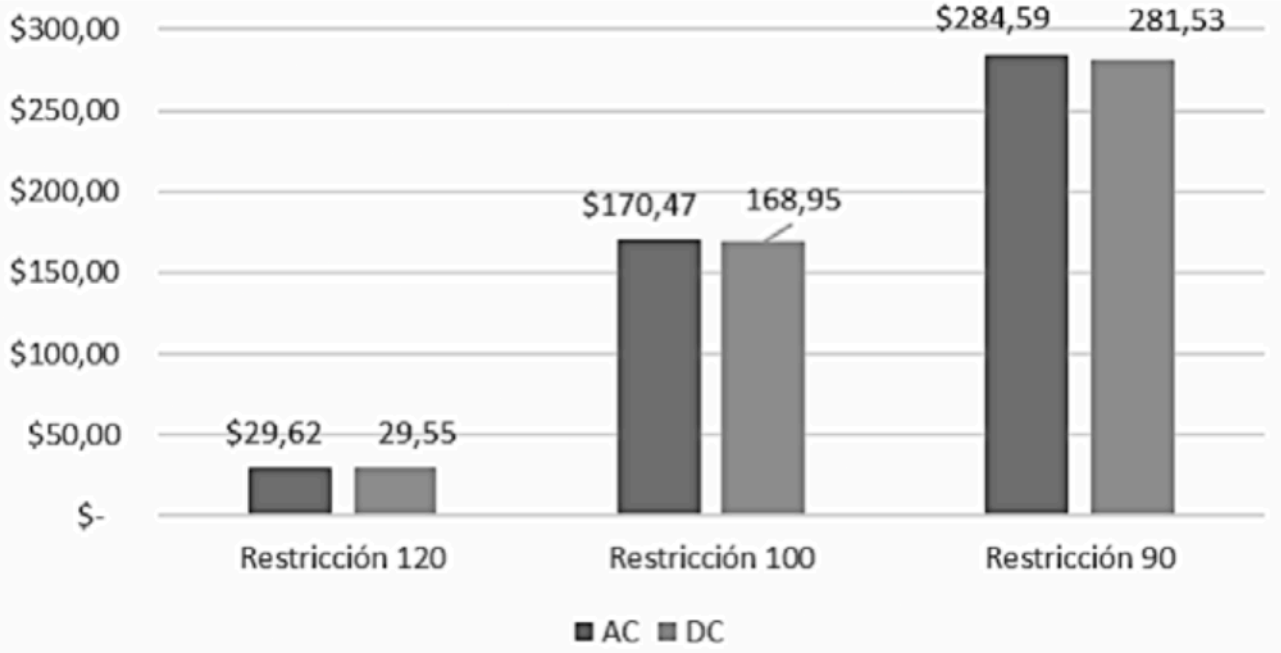
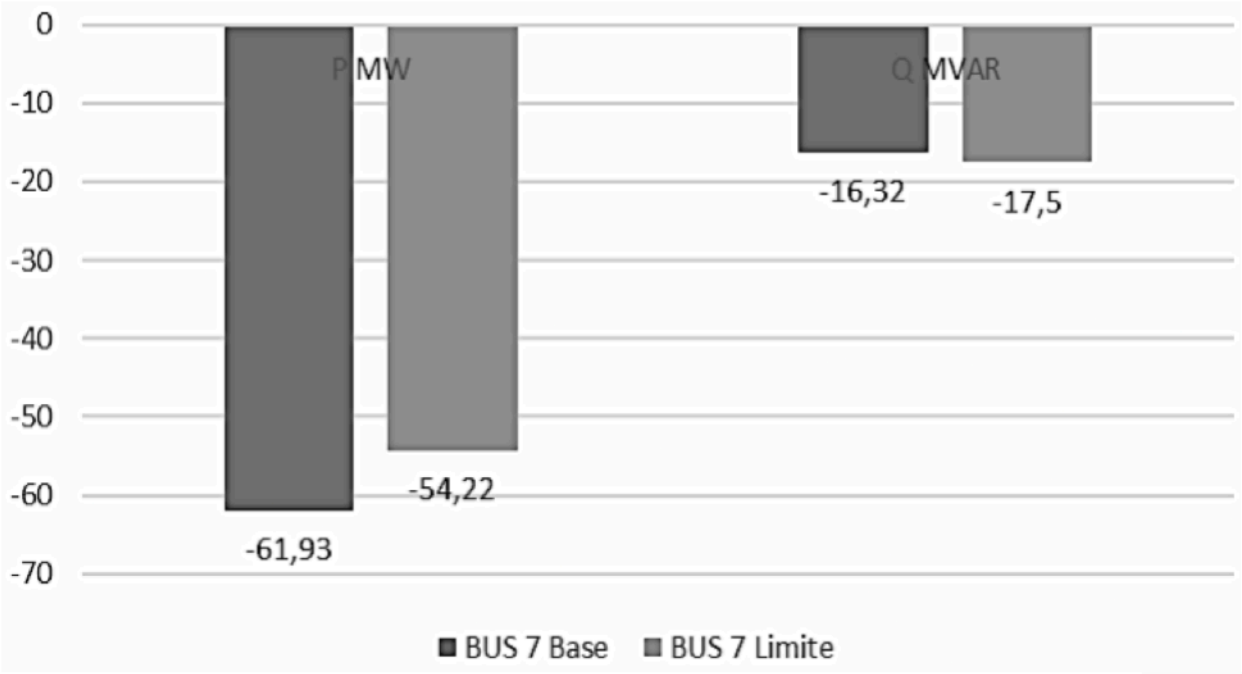


Fig. 5. Determinación del precio sombra

De la misma forma que se realizó la limitación de la potencia en los generadores más baratos, se plantea las limitaciones de potencia en los nodos. Así, aleatoriamente se decidió limitar la potencia en la línea 6 (nodos 7-8) y 8 (nodos 8-9) para poder analizar precios



nodales, costos y flujos.

Es importante mencionar que las pérdidas se consideran únicamente en el flujo AC más no en el DC ya que en este, se linealizan las ecuaciones y eso desencadena en la omisión la parte reactiva en el flujo de potencia. Como se observa en la figura 5, al colocar la restricción en menores proporciones las perdidas disminuyen.

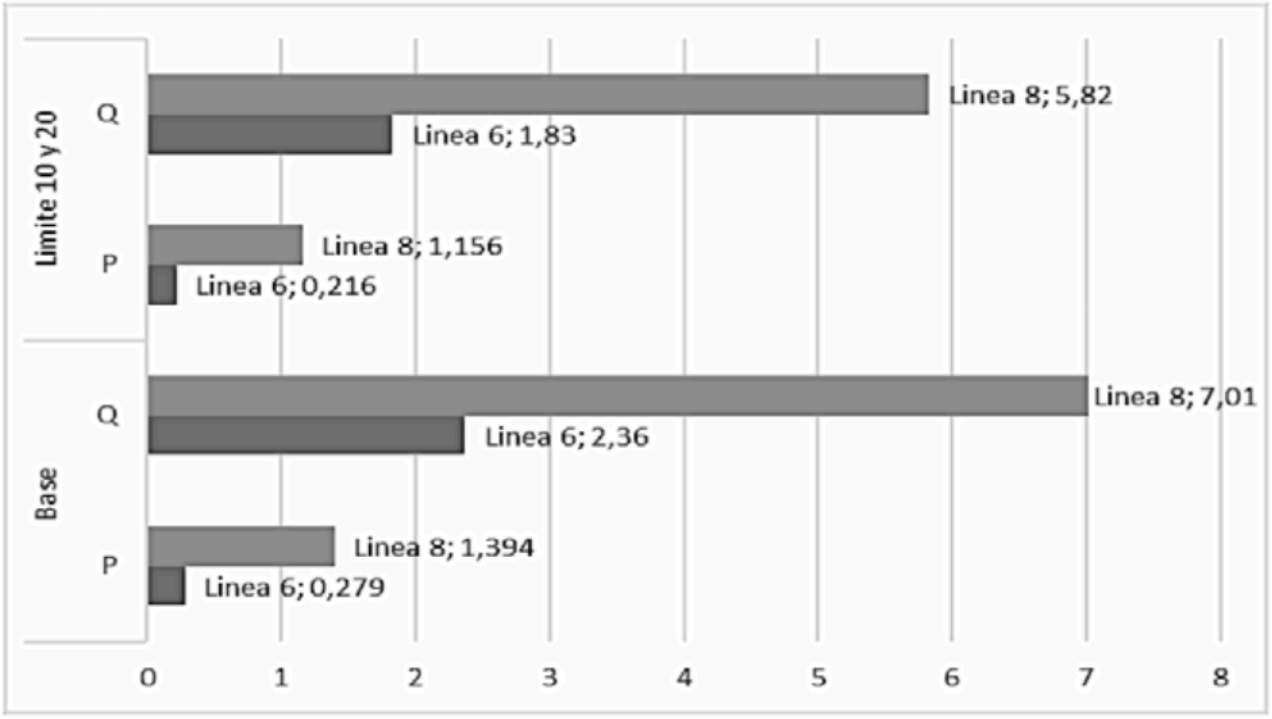


Fig. 6. Comparación de pérdidas en los nodos de análisis

De forma individual, de consideran las limitaciones de potencia en las líneas 6 y líneas 8 tanto para el BUS 7 (base y límite), BUS 8 (base y límite) y BUS 9 (base y límite) en las figuras 7,8,9 y 10.

Fig. 7. Limitación de potencia para línea 6 en BUS7.

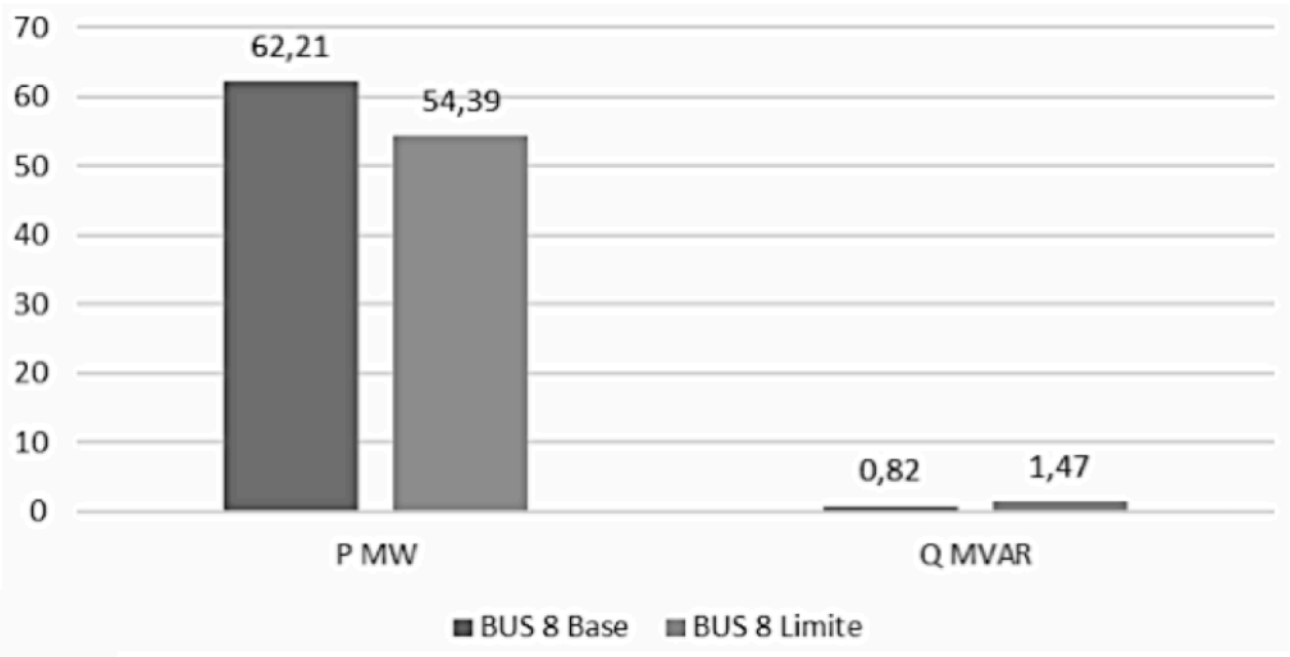


Fig. 8. Limitación de potencia para línea 6 en BUS8.

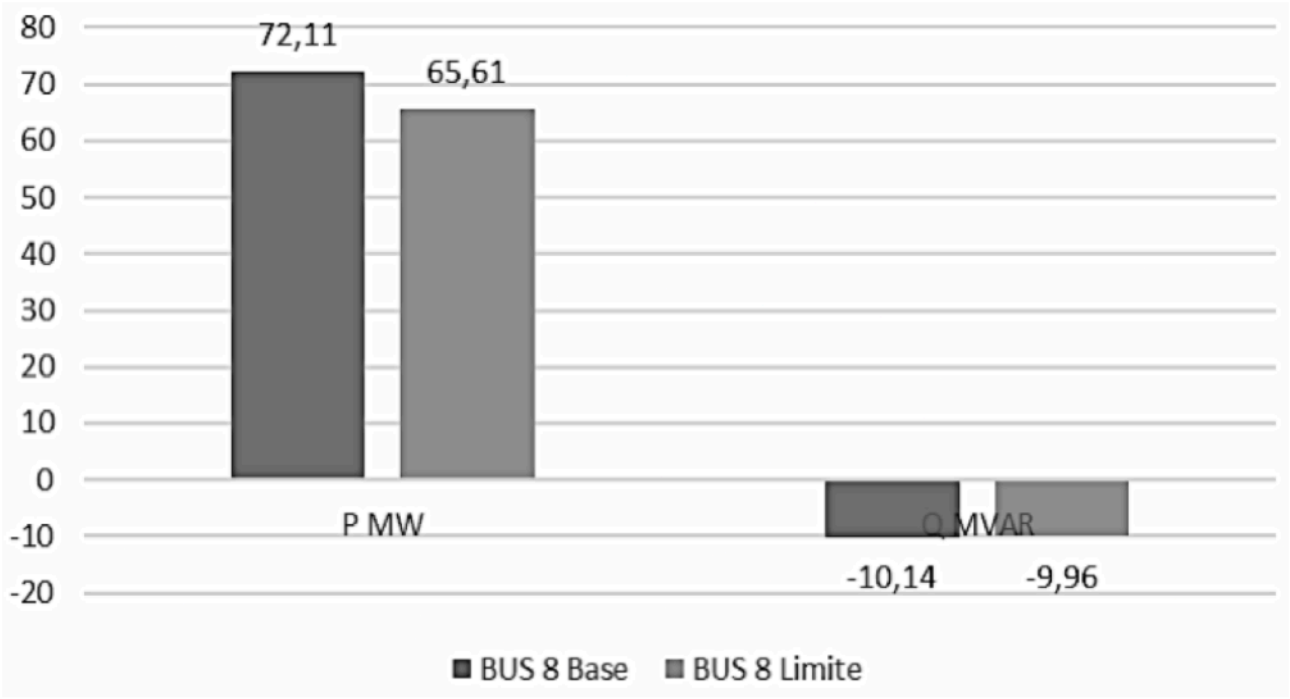
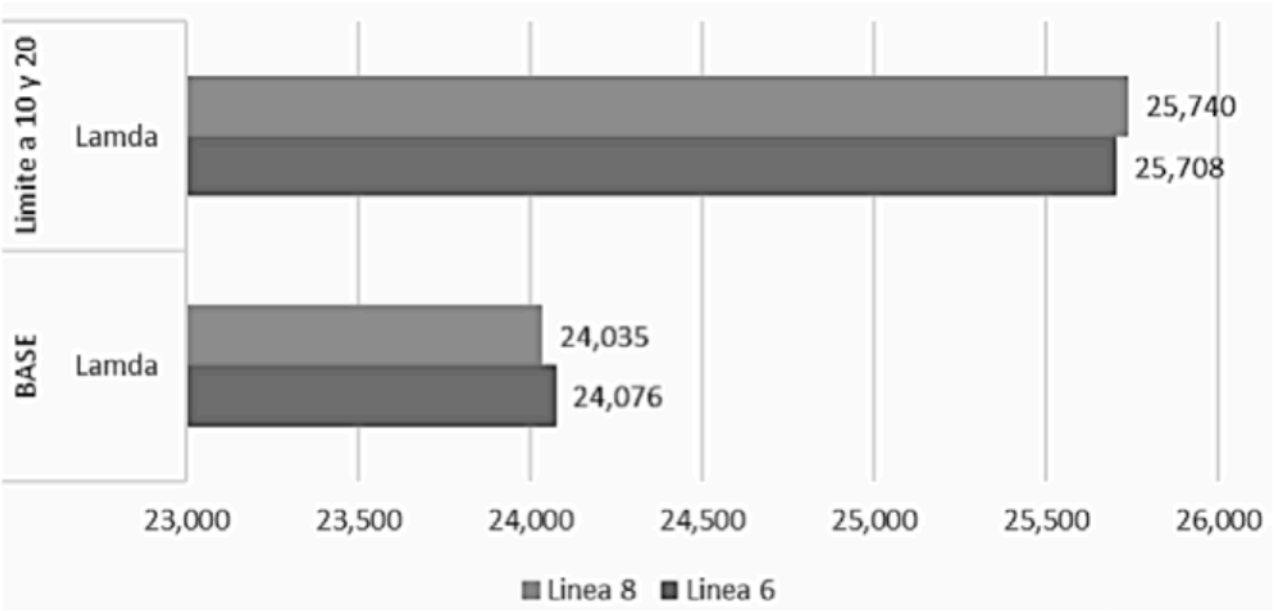


Fig. 9. Limitación de potencia para línea 8 en BUS 7.



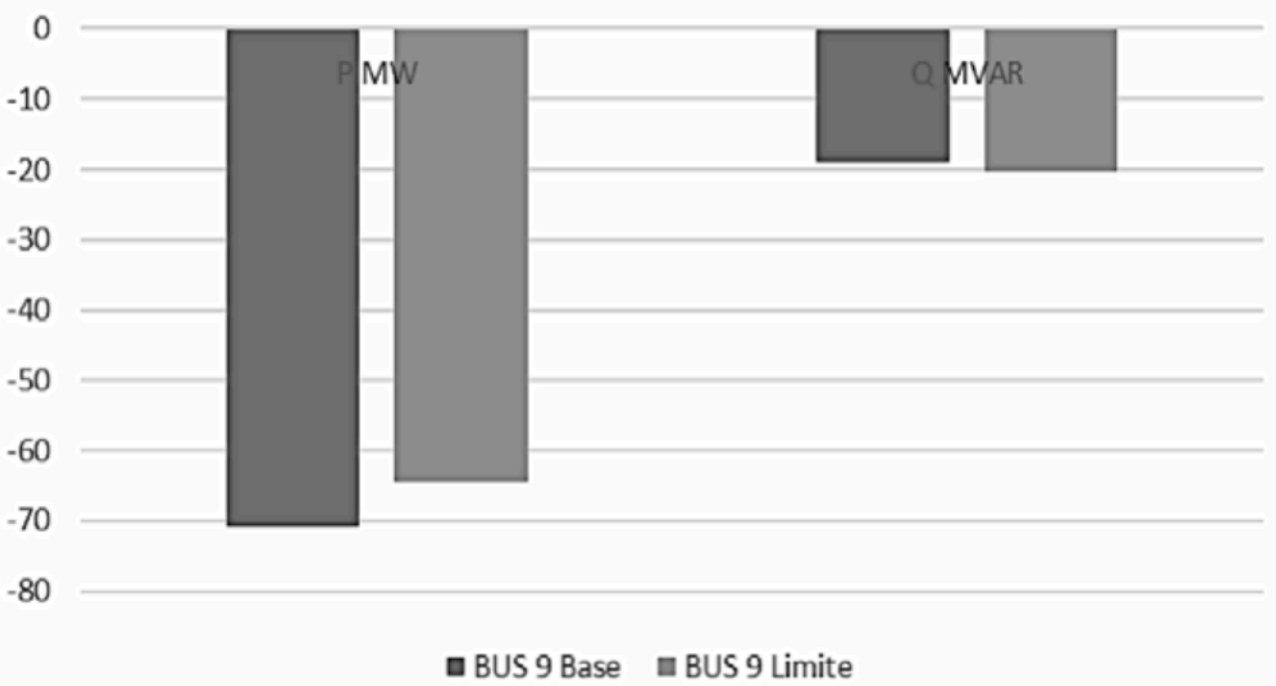


Fig. 10. Limitación de potencia para línea 8 en BUS8.

El costo de generación, así como los precios nodales (Ver gráficas 7, 8, 9 y 10) tienden a subir, cabe indicar que el precio nodal se multiplica con la potencia generada.

De esta manera, se presenta en la figura 11 los costos de generación con restricciones en las 6 y 8 analizadas previamente.

Fig. 11 Costo de generación con restricciones en línea 6 y 8.

Finalmente, es necesario calcular las rentas de congestión para flujos de potencia en AC y DC sin restricción y el flujo en DC sin límites, cabe destacar que el flujo en la línea se sitúa en el límite que se estableció previamente. De esta forma, la tabla 10 muestra la renta de congestión para el flujo en DC sin restricción, la tabla 11 indica la renta de congestión para el flujo en AC sin restricción y la tabla 12 muestra la renta de congestión para el flujo en DC con límites.

Tabla 10. Rentas de congestión del flujo en DC sin restricción

DC SIN RESTRICCION						
Brnch #	**From Bus**	**Lambda ($/MWh) P**	**To Bus**	**Lambda ($/MWh) P**	**rateA**	**Renta congestión**
1	1	24,552	4	24,552	250	0
2	4	24,552	5	24,552	250	0
3	5	24,552	6	24,552	150	0
4	3	24,552	6	24,552	300	0
5	6	24,552	7	24,552	150	0
6	7	24,552	8	24,552	250	0
7	8	24,552	2	24,552	250	0

DC SIN RESTRICCION						
Brnch #	From Bus	Lambda ($/MWh) P	To Bus	Lambda ($/MWh) P	rateA	Renta congestión
8	8	24,552	9	24,552	250	0
9	9	24,552	4	24,552	250	0

Fuente: Autores

Tabla 11. Rentas de congestión del flujo en AC sin restricción

AC SIN RESTRICCION						
Brnch #	From Bus	Lambda ($/MWh) P	To Bus	Lambda ($/MWh) P	rateA	Renta congestión
1	1	25,25	4	25,25	250	0
2	4	25,25	5	24,501	250	62,75
3	5	24,501	6	24,567	150	-140,1
4	3	24,567	6	24,567	300	0
5	6	24,567	7	24,762	150	29,25
6	7	24,762	8	24,547	250	-53,75
7	8	24,547	2	24,547	250	0
8	8	24,547	9	24,505	250	239,5
9	9	25,505	4	25,25	250	-63,75

Fuente: Autores

Tabla 12. Renta de congestión del flujo en DC con límite.

DC CON LIMITE						
Brnch #	From Bus	Lambda ($/MWh) P	To Bus	Lambda ($/MWh) P	rateA	Renta congestión
1	1	34,546	4	34,546	250	0
2	4	34,546	5	31,43	250	779

DC CON LIMITE						
Brnch #	From Bus	Lambda ($/MWh) P	To Bus	Lambda ($/MWh) P	rateA	Renta congestión
3	5	31,43	6	25,671	150	863,85
4	3	25,671	6	25,671	300	0
5	6	25,671	7	22,257	150	512,1
6	7	22,257	8	14,8	40	298,28

Fuente: Autores

Conclusiones

El valor máximo que se puede establecer en la barra dos es de 134.38 Mw al colocar valores mayores automáticamente el programa coloca por defecto una restricción en el generador dos de 134,38Mw.

Respecto al DC OPTIMAL POWER FLOW al colocar restricciones de potencia inferiores a 134.38Mw en el generador con costo de generación más barato, el módulo del voltaje se mantiene sin embargo el ángulo vario, a su vez la potencia de los generadores uno y tres varían para compensar la carga, el costo de generación se incrementa a medida que la restricción de potencia en el generador más barato disminuye

Respecto al AC OPTIMAL POWER FLOW al colocar restricciones de potencia inferiores a 134,38 Mw en el generador con costo de generación más barato, tanto módulo como ángulo en el voltaje cambian, la potencia activa generada varia ene l caso de la potencia reactiva se empiezan a generar valores negativos principalmente en el generador dos, el costo de generación está en función de las restricciones.

Tanto DC-OPF como AC-OPF a medida que la restricción de generación en el generador más barato disminuye el precio sombra aumenta.

Los flujos de potencia en DC se usan para analizar nuestro sistema inicial sin considerar las pérdidas y no da una referencia para tener datos iniciales del SEP.

En los flujos AC se asemeja más a la realidad del SEP la desventaja radica en que al aumentar las restricciones de potencia reactiva el sistema tal vez no converge si los límites de voltaje son muy pequeños o las restricciones no son adecuadas al sistema.

Las rentas de congestión aparecen con el desbalance creado por las restricciones impuestas en las líneas de transmisión lo cual crea un desequilibrio de precios nodales. Por este motivo en el flujo en que no se consideran restricciones el valor de la renta de congestión es nulo en todas las líneas.

Referencias

B. k. Sarkar, A. De, and A. Chakrabarti, "Impact of Distributed Generation for congestion relief in power networks," in 2012 1st International Conference on Power and Energy in NERIST (ICPEN), 2012, pp. 1–6.

Una Revisión Acerca de Tecnologías y Modelación de Enlaces HVDC para Estudios Eléctricos

José Enriquez[1], Ricardo Rosero[2]
[1] Universidad Politécnica Salesiana, Maestría en electricidad Mención Sistemas Eléctrico en Potencia. Quito, (Ecuador)
[2]SUCRE Instituto Tecnológico Superior, Carrera de Electricidad Av. 10 de Agosto N26-27 y Luis Mosquera Narváez, Quito, Ecuador.

[1] jenriquezq@est.ups.edu.ec, [2]rrosero@tecnologicosucre.edu.ec

RESUMEN

Los sistemas Corriente Continua de Alta Tensión (HVDC), actualmente son muy utilizados a nivel mundial debido a sus ventajas frente a sistemas de transmisión tradicionales. En el presente artículo se realiza una investigación sobre la modelación y simulación estático-dinámica de los sistemas HVDC. Los modelos encontrados se basan en conversores tipo fuente de corriente (LCC), conversores tipo fuente de voltaje (VSC), conversores modulares multinivel (MMC), sistemas multiterminal DC (MTDC) y de alimentación múltiple (multi-infeed HVDC). Las principales simulaciones, son transitorios electromagnéticos (EMT), estado cuasi estacionario (QSS), simulaciones híbridas de fasores dinámicos y transitorios electromecánicos, simulaciones híbridas de transitorios electromagnéticos (EMT) y estabilidad transitoria (TS), fasores dinámicos basado en interfaz (DPIM) para simulaciones híbridas EMT y TS, flujos de potencia HVDC y simulación digital de tiempo real (RTDS), determinando la complejidad de los sistemas HVDC en el modelado, simulación y controles con el objetivo de que enlaces mixtos AC/DC sean factibles técnicamente.

Palabras Clave: Estabilidad Transitoria, HVDC, Control HVDC, Modelos HVDC, Simulación HVDC.

Introducción

Los sistemas de transmisión HVDC han tenido un gran desarrollo a lo largo de los años gracias a sus ventajas frente a los sistemas tradicionales y que han permitido solventar los principales problemas de los sistemas de transmisión AC [1].

- Con el aumento de la longitud de la línea se incrementa las pérdidas de transmisión.
- La capacidad de transmisión es inversamente proporcional a la distancia de líneas AC.
- Para mantener el voltaje en las terminales de la línea, se requiere un control de voltaje relacionado a requerimientos de potencia reactiva.
- Se requiere de compensación para resolver el problema de capacidad de carga y limitaciones de estabilidad en líneas AC.
- Se requiere de controles complejos para la interconexión entre dos sistemas de potencia, como es el control automático de generación para el control de frecuencia e intercambio en ambas áreas.
- Problemas en la capacidad de transmisión, debido a la impedancia de la tierra en líneas AC

Por medio de sistemas HVDC se pueden resolver los problemas en sistemas de transmisión AC [1].

- Las pérdidas en sistemas DC se reducen en 2/3 comparado con los sistemas AC.
- El costo de líneas DC es menor que las líneas AC, para líneas aéreas de longitudes variables desde 500 km a 800 km y 50 km para cables.
- En líneas DC la capacidad de transmisión no se afecta con el incremento de la longitud de la línea.
- En líneas DC no requieren de potencias reactivas, para las estaciones convertidoras para la capacidad de transmisión

- Las líneas DC no necesitan compensación.
- Debido a la rápida capacidad de control, estos sistemas tienen la capacidad de mejorar la estabilidad transitoria y dinámica en redes AC asociadas. Así como también es posible la interconexión entre sistemas asíncronos.
- En sistemas DC la impedancia de tierra puede ser despreciada.
- La confiabilidad de líneas DC es comparable a las líneas AC y es superior al 90%.
- Gran integración con varios tipos de energías renovables.

Como resultado de estas ventajas, se han desarrollado gran cantidad de proyectos HVDC en el mundo. En Latinoamérica varios proyectos son evaluados como una oportunidad para la integración energética regional [2]. Por ejemplo, la interconexión Colombia-Panamá a través de una línea HVDC de aproximadamente 614 km de longitud y con una capacidad de transferencia de 300 MW y 200 MW en sentido contrario. Otro ejemplo es la interconexión Argentina-Brasil compuesto de dos líneas y un enlace HVDC back to back debido a la diferencia de frecuencias de los sistemas, con capacidad de 2000 MW en la dirección Argentina-Brasil y 800 MW en la dirección opuesta; interconexión Brasil-Uruguay mediante una estación convertidora back to back HVDC, con capacidad de 500 MW.

Se puede concluir que la integración energética regional a futuro dependerá cada vez más de enlaces HVDC, debido a las ventajas de estos sistemas, sin embargo, existen algunos problemas relacionados a la interacción de los componentes electrónicos de los sistemas DC con los sistemas AC asociados. Es por este que el presente trabajo realiza una revisión de modelos, métodos de simulación y controles referentes a sistemas HVDC, que permitan evaluar el estado estable y transitoria entre sistemas mixtos AC/DC interconectados.

Modelos empleados en sistemas HVDC

En [3], se utiliza un sistema de transmisión HVDC Light basado en tecnología de fuente de voltaje (VSC) y modulador de ancho de pulso. Se plantean dos modelos, un sistema mono polar de dos terminales AC y un sistema AC/DC en paralelo que consiste en convertidores de fuente de voltaje que se representan en la Figura 1 y Figura 2, respectivamente. Se propone un controlador óptimo basado en los modelos propuestos. Su comparación de amortiguamiento entre los modelos HVDC Light con el controlador propuesto y un sistema HVDC convencional, con simulaciones de fallas AC se verifica un mejoramiento de estabilidad transitoria con HVDC Light y el control propuesto.

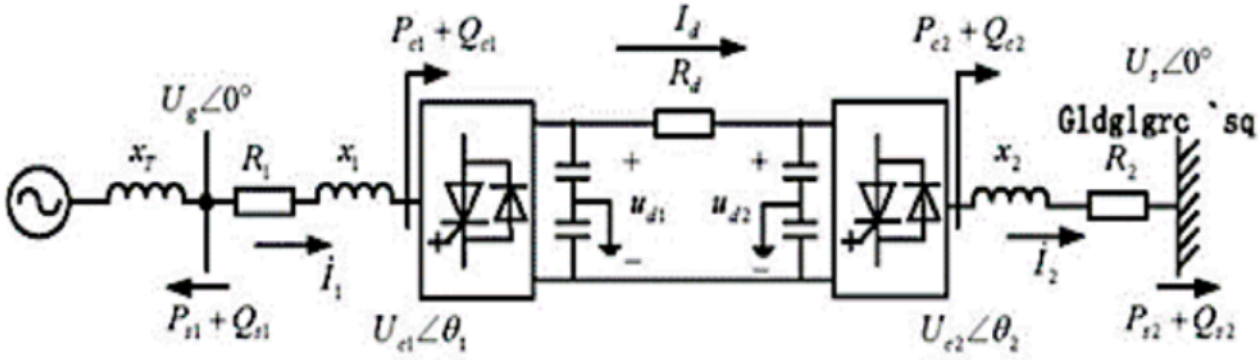


Fig. 1. Representación de una red DC mono polar de dos terminales [3]

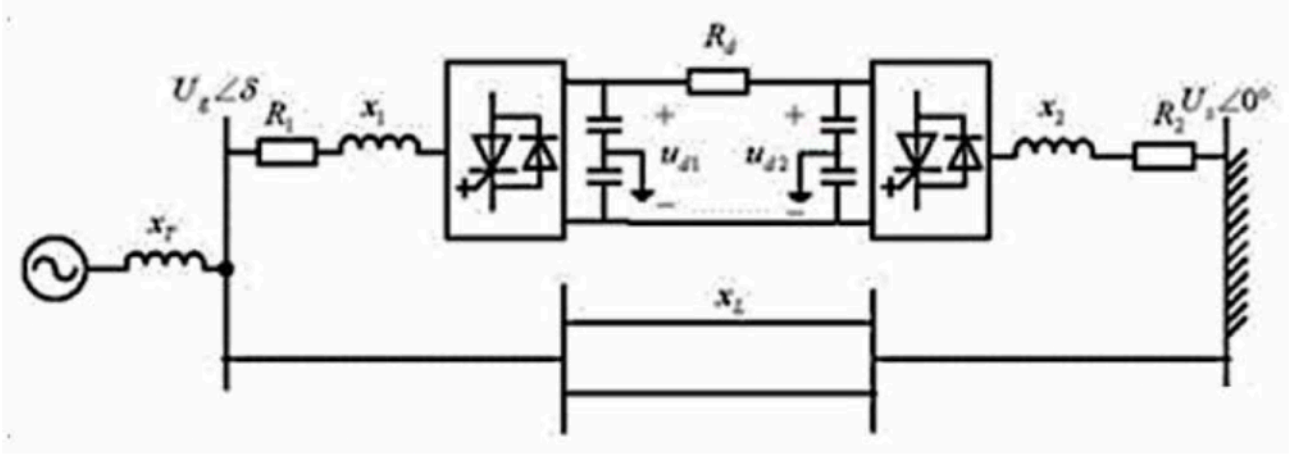


Fig. 2. Sistema de potencia AC/DC paralelo [3]

El control propuesto en [3], emplea teoría de control óptimo lineal para encontrar un punto de operación óptimo de una función dependiente de las variables de estado típicas de un generador como son ángulo de potencia, velocidad angular, voltaje a los terminales del generador y voltaje de excitación; así como variables típicas de control HVDC como ángulo de retardo de disparo de la válvula y ángulo de disparo de avance de la válvula.

En [4] se estudia un sistema real HVDC de alimentación múltiple, es decir un sistema en el cual varios enlaces HVDC terminan cerca de un sistema AC común y la impedancia AC entre dos sistemas HVDC es baja. Se estudia estabilidad transitoria bajo varias condiciones de falla, efectos de carga y reserva rodante en el sistema de potencia de Shanghai, que está compuesto por tres enlaces HVDC que terminan en un centro de carga, las estaciones convertidoras de los enlaces HVDC están cerca y la interacción entre los sistemas AC y DC es fuerte, lo cual pone en riesgo la operación segura y estable del sistema.

El Sistema de Potencia de Shanghai forma parte del Sistema de Potencia del Este de China. Los sistemas AC en el lado del rectificador y del inversor son sistemas asíncronos, en el caso de estudio la potencia activa transmitida por las líneas AC es aproximadamente 1600 MW y 10600 MW es transmitida por tres líneas DC. En la Figura 3 se presenta un diagrama general del sistema simulado.

Se simulan contingencias N-1 en líneas AC y DC y el sistema se mantiene estable. Se simulan contingencias AC en barras sin protección diferencial, el sistema se estabiliza únicamente con el disparo de varias centrales de generación, por lo que se concluye que la protección diferencial de barra siempre debe estar activada. Se reduce la reserva rodante hasta cero, el sistema se mantiene estable bajo la salida simple o bipolar de un enlace DC, sin embargo, la desviación de frecuencia es grande y para evitar la caída abrupta de frecuencia se utiliza un esquema de alivio de carga. Se evalúa la estabilidad transitoria con contingencias N-1 en una línea AC, con un modelo estático ZIP para la carga que incluye dependencia de la frecuencia, el modelo de carga se divide en 6 clases, como se observa en la Figura 4. Un incremento en el peso del término de potencia constante reduce el margen de estabilidad del sistema, el sistema se mantiene estable cuando se produce un disparo a 0.1 segundos en líneas de 500 kV AC. De igual forma se evalúa la estabilidad transitoria con motores de inducción en el modelo de carga, un incremento en el peso de este término reduce el margen de estabilidad, el sistema se mantiene estable cuando se produce un disparo a 0.1 segundos en líneas de 500 kV AC.

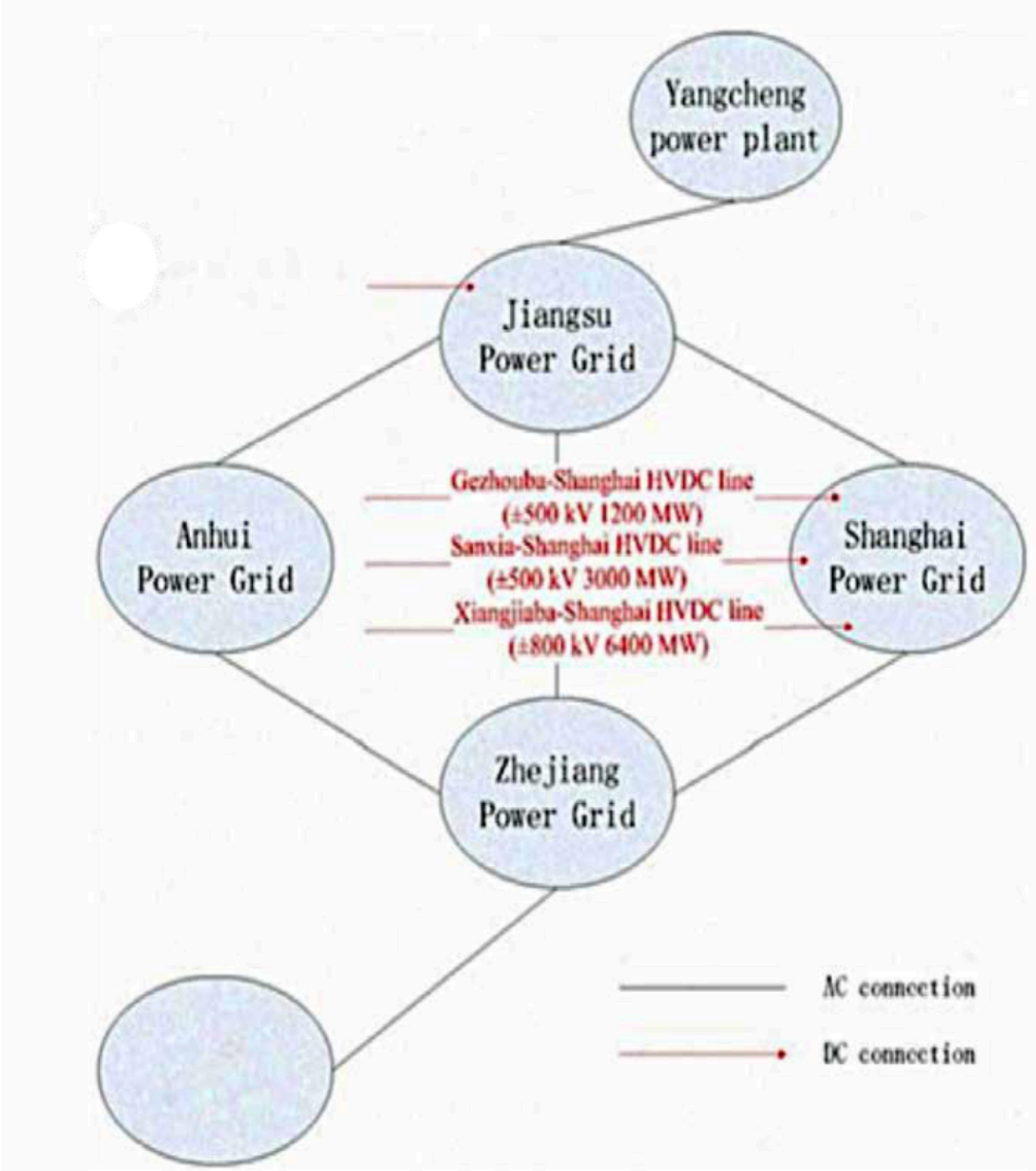


Fig. 3. Estructura del Sistema de Potencia del Este de China [4]

En [5], se evalúa la estabilidad transitoria de voltaje en un sistema HVDC de alimentación múltiple, con enlaces tipo fuente de corriente LCC HVDC y tipo fuente de voltaje VSC HVDC, que se representa en la Figura 5. La capacidad de soporte de voltaje del enlace VSC HVDC está influenciado por la distancia de la línea de interconexión entre dos enlaces y el tamaño de la carga.

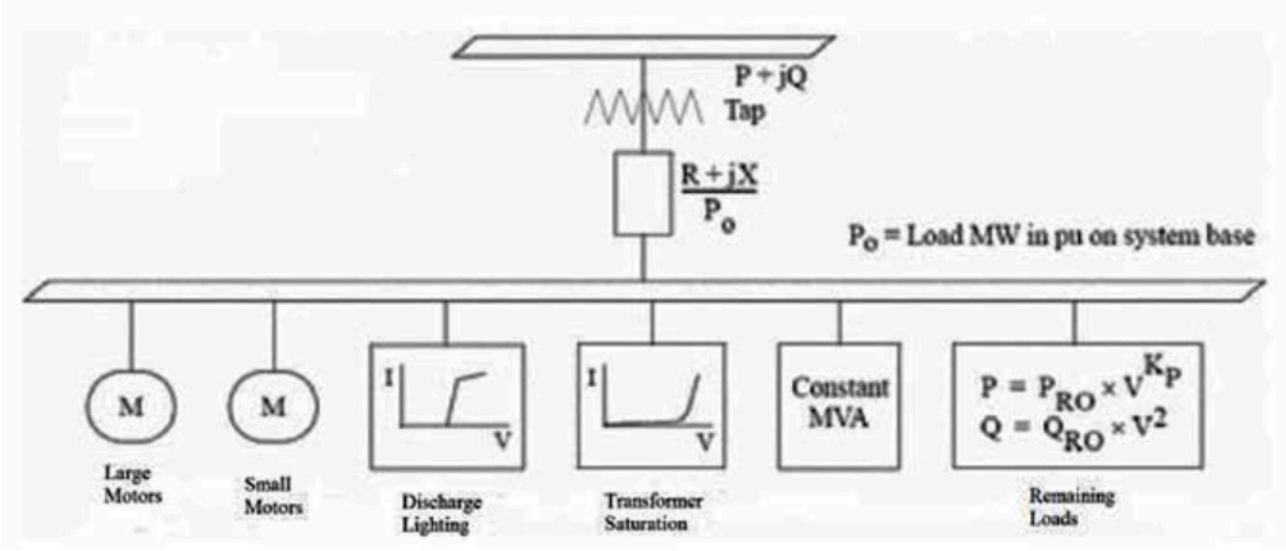


Fig. 4. Modelo de carga complejo en una barra representativa [4]

Los enlaces LCC-HVDC no pueden suministrar potencia reactiva, pero necesitan de esta potencia para funcionar normalmente, por lo que generalmente funcionan con un banco de capacitores en la barra AC. La aplicación de un banco de capacitores, reduce el radio de cortocircuito efectivo (ESCR por sus siglas en inglés), durante una falla un valor bajo de SCR puede producir una caída de voltaje que puede provocar falla de conmutación del enlace LCC-HVDC y por lo tanto inestabilidad de voltaje.

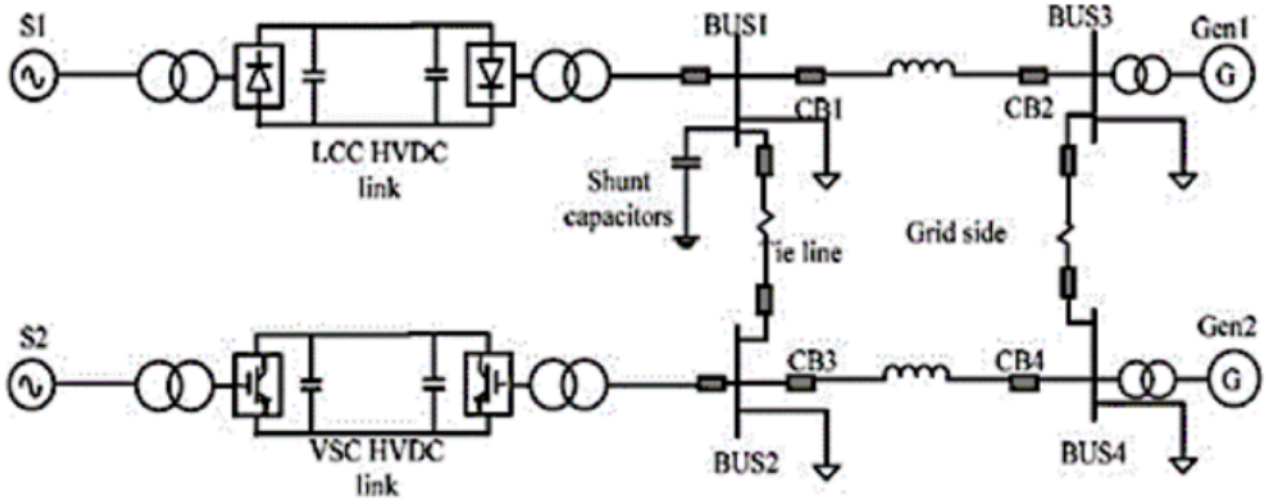


Fig. 5. Sistema HVDC híbrido de doble entrada [5]

El enlace VSC-HVDC actúa como un equipo de compensación de potencia reactiva, por lo tanto, la potencia reactiva necesaria para mantener el voltaje en la barra donde se conecta el enlace LCC HVDC en condiciones de falla se introduce en el lazo de control del enlace VSC-HVDC, que se muestra en la Figura 6. En los resultados de la simulación el método de ajuste de voltaje mejora la estabilidad transitoria de voltaje y se concluye que existe una relación entre los requerimientos de potencia reactiva y los parámetros del sistema como por ejemplo la longitud de la línea de interconexión entre los sistemas LCC y VSC, debido a que mientras mayor sea la longitud de la línea mayor será la dificultad de transmitir la potencia de compensación desde el enlace tipo VSC al enlace tipo LCC.

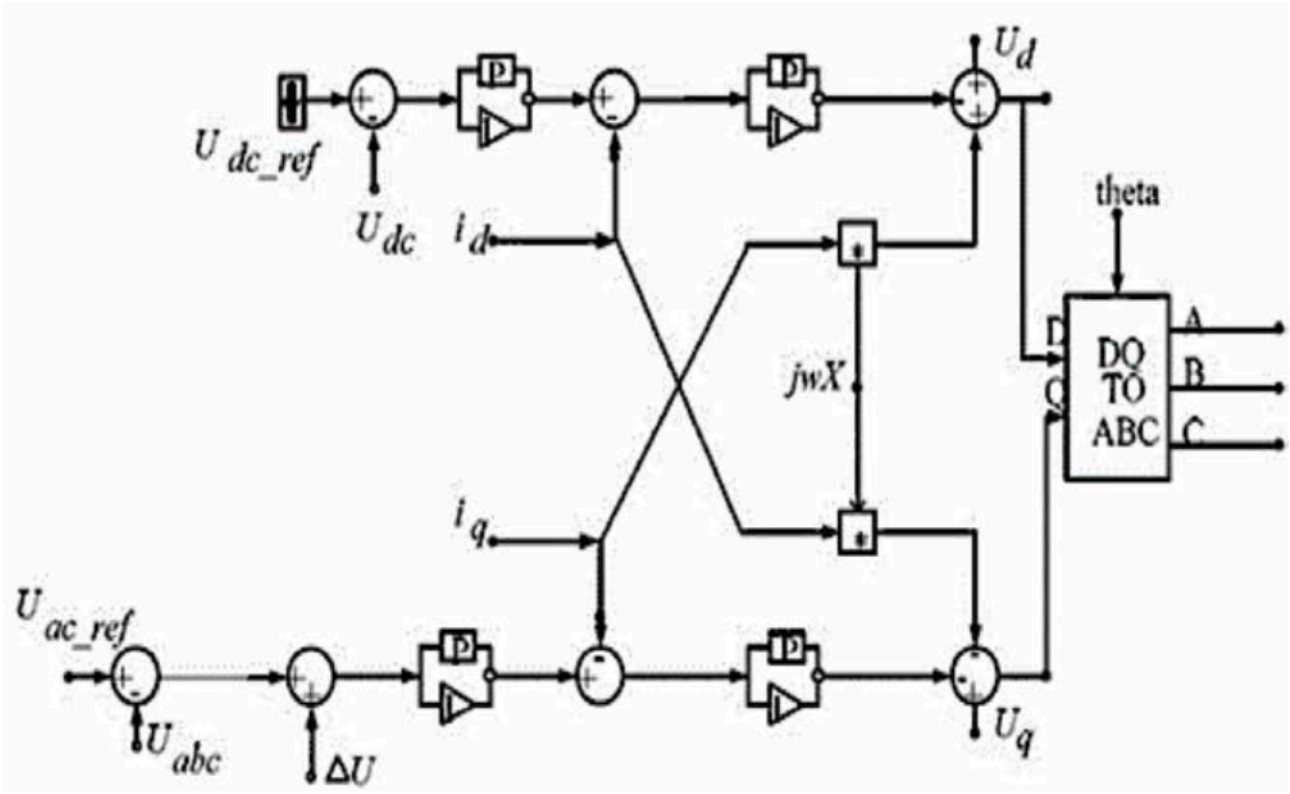


Fig. 6. Método de ajuste de voltaje del lado de la red VSC [5]

En [6], se evalúa las respuestas transitorias en fallas AC y DC en una red con una línea de transmisión HVDC fija y varias líneas de transmisión HVAC. La estabilidad de ángulo del rotor y el manejo de potencia reactiva son investigados para definir la respuesta transitoria de la red. La respuesta transitoria no se puede evaluar en conjunto, por lo que se simula una falla en la línea HVDC y una falla trifásica a tierra en la línea HVAC del sistema de la Figura 7 y Figura 8, por separado. En fallas DC, la estabilidad de ángulo de rotor se mejora con el incremento de la longitud de la línea de transmisión AC. La oscilación de potencia activa se reduce a medida que aumenta la longitud de la línea de trasmisión HVAC. En términos de caída de voltaje, mientras más corta la línea de transmisión HVAC, más baja es la amplitud de voltaje del terminal, que también se estabiliza más rápido. En fallas AC, la estabilidad de ángulo de rotor decrece con el incremento de la longitud de una línea de transmisión HVAC.

La fluctuación de potencia activa se reduce con el aumento de la longitud de la línea HVAC. Para generadores que no están en el área donde ocurre la falla, mientras más corta sea la línea de transmisión HVAC, mayor es la caída de voltaje, más baja la amplitud de la oscilación de voltaje en el terminal que se reduce más rápido. Sin embargo, para generadores en el área de la falla AC, la caída de voltaje terminal es muy alta independiente de la longitud de la línea de transmisión HVAC.

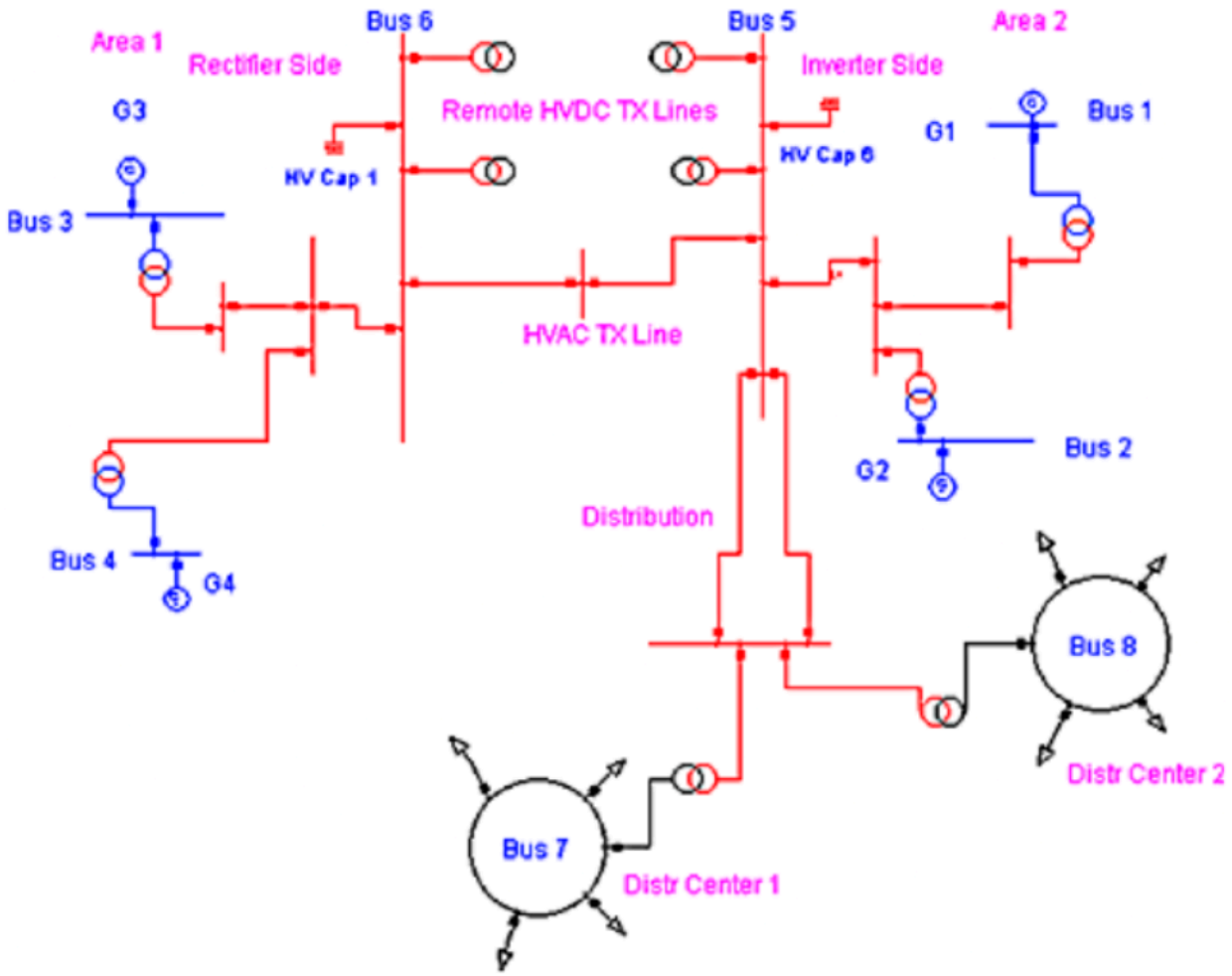


Fig. 7. Sección AC del sistema de potencia [6]

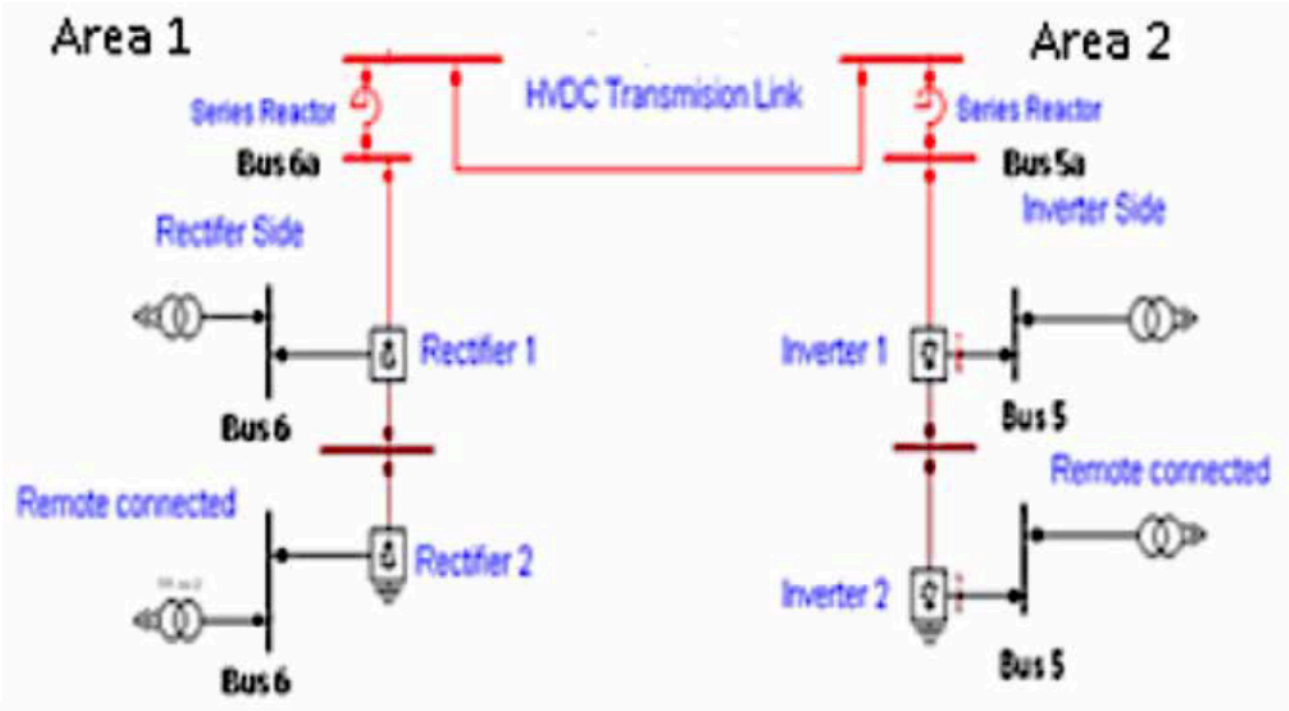


Fig. 8. Esquema HVDC entre las barras 5 y 6 [6]

En [7], se analiza el mejoramiento de estabilidad transitoria por control de potencia de emergencia y amortiguamiento de pequeñas oscilaciones con modulación de potencia activa de enlaces HVDC, el modelo de control usado se muestra en la Figura 9.

Cuando líneas AC y DC están en paralelo, es posible ajustar la potencia de transmisión DC de acuerdo a los parámetros operativos de la línea AC, mejorando la estabilidad de la línea AC en paralelo y la capacidad de transmisión. En sistemas interconectados con gran cantidad de potencia transmitida a largas distancias, se presentan problemas de estabilidad transitoria y oscilaciones inter-área. El control de potencia de emergencia y la modulación de potencia activa de los enlaces HVDC ayuda a mejorar la estabilidad transitoria y amortiguar las oscilaciones inter-área.

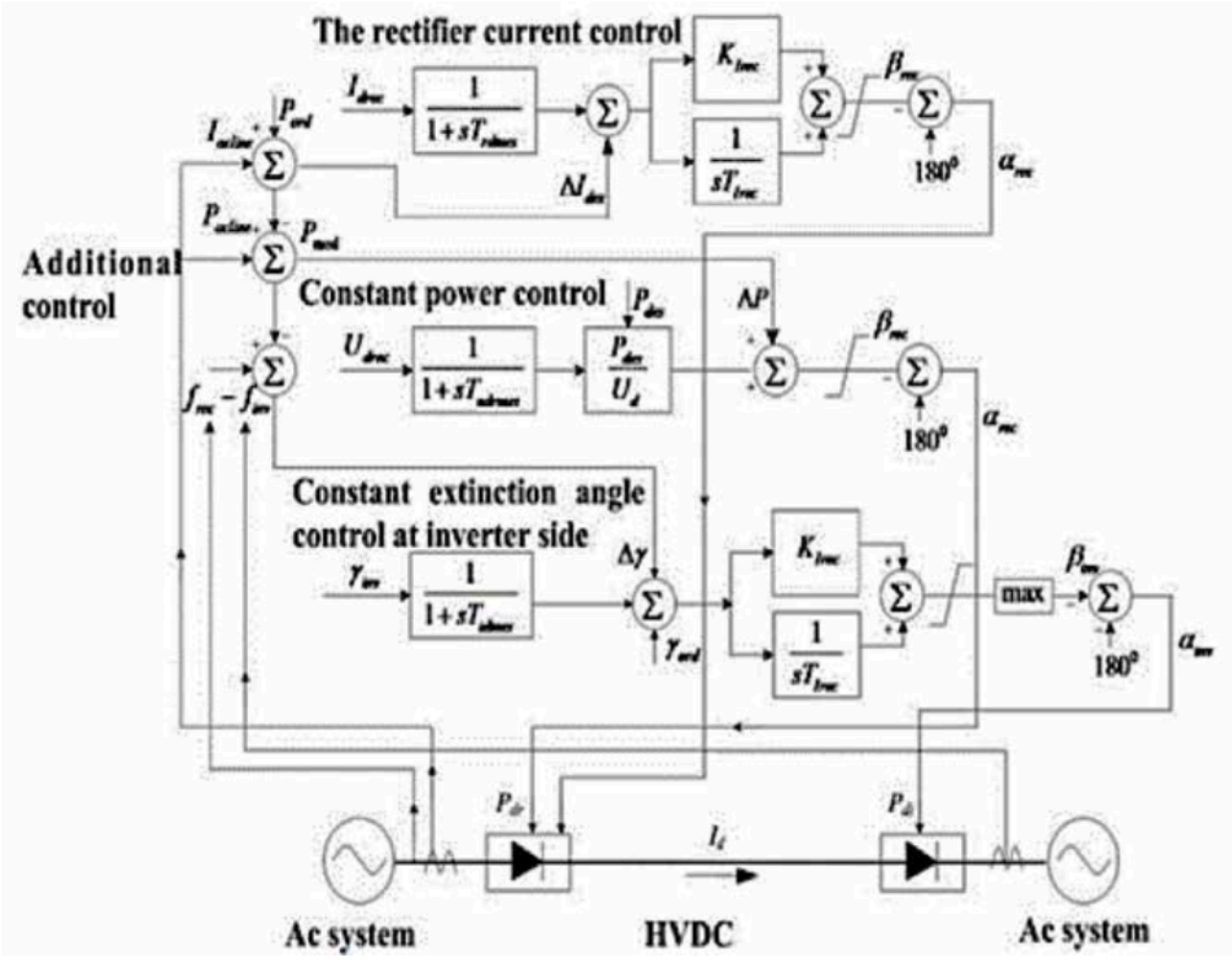


Fig. 9. Circuito principal y estructura de control usado para HVDC [7]

En la actualidad los sistemas de transmisión HVDC juegan un papel importante en los sistemas interconectados modernos a gran escala. Para estudiar el impacto de sistemas HVDC en sistemas AC/DC se debe desarrollar modelos HVDC sofisticados. Dos tipos de modelos de sistemas HVDC son comúnmente utilizados. Uno es el modelo de transitorios electromagnéticos (EMT por sus siglas en inglés) con pasos de tiempo muy pequeños (no más de 0.1 ms). El otro es el modelo de estado cuasi estacionario (QSS por sus siglas en inglés) usado ampliamente en simulación de estabilidad transitoria con pasos más grandes (5 ms). En general el primero no es adecuado para análisis de estabilidad transitoria en sistemas de gran escala AC/DC por sus pasos de tiempo muy pequeños y costo de tiempo

de CPU; en el segundo es difícil considerar fallas AC asimétricas y fallas de conmutación del conversor DC afectan la estabilidad

transitoria para la simplificación del modelo. La teoría de fasores dinámicos ha sido aplicada en la modelación de dispositivos electrónicos, el modelo de fasores dinámicos es capaz de retener las características dinámicas dominantes de dispositivos electrónicos y es adecuado para el estudio de estabilidad transitoria en sistemas de potencia. En [8], un modelo de simulación híbrido se sugiere, donde el sistema DC está en modelo de fasores dinámicos y el sistema AC en modelo tradicional electromecánico. Los resultados de la simulación muestran que el modelo de fasores dinámicos HVDC tiene buena precisión comparada con el modelo de transitorios electromagnéticos, pero usa mucho menos tiempo de CPU en la simulación; las simulaciones en un sistema de potencia de dos áreas AC/DC y un sistema de múltiple alimentación HVDC muestra la efectividad del algoritmo en el análisis de estabilidad transitoria.

Simulaciones híbridas de transitorios electromagnéticos (EMT) y estabilidad transitoria son principalmente usadas para analizar las interacciones entre sistemas HVDC y redes AC. La dinámica de los conversores puede ser afectada por formas de onda de sistemas AC adyacentes. La distorsión de la forma de onda, así como el retardo de tiempo causado por la interconexión (entre subsistema de estabilidad transitoria y transitorios electromagnéticos) puede incrementar significativamente los errores, dando como resultado la disminución de la precisión de las simulaciones. Para resolver esos problemas, en [9], se propone un modelo de fasores dinámicos basado en interfaz (DPIM por sus siglas en inglés) para mejorar la precisión de las interfaces, especialmente cuando ocurre una falla cerca de los conversores.

Para hacer esto el sistema completo se divide en tres partes: subsistema de estabilidad transitoria (TS por sus siglas en inglés), subsistema de transitorios electromagnéticos (EMT por sus siglas en inglés) y el DPIM. Durante cada iteración, las interconexiones entre el subsistema TS y DPIM son representados por sus equivalentes de Norton a frecuencia fundamental y equivalentes de Thevenin en la forma de fasores dinámicos. En forma similar, las interfaces entre subsistemas DPIM y EMT son representadas por sus equivalentes trifásicos de Norton y equivalentes de Thevenin en fasores dinámicos respectivamente. El modelo DPIM mejora la precisión de la simulación de simulaciones híbridas, especialmente con las aplicaciones para la transmisión a gran escala de energías renovables con LCC-HVDC.

En [10], se usan modelos para flujos de potencia y modelos dinámicos aceptados por la industria para modelar interconexiones del Este y Oeste de Estados Unidos a través de varios enlaces HVDC. Se estudia al sistema HVDC como una macro red dentro de una red AC interconectada, el estudio de este tipo de interconexiones podrían traer beneficios económicos como aumentar la capacidad de intercambio interregional y disminuir el costo de las transferencias a centros de carga distantes. El modelo proporciona información de factibilidad y pruebas iniciales de estado estable y estabilidad de una macro red HVDC y su interacción con la red AC existente, abriendo la puerta al análisis técnico de estas macro redes.

El proceso de modelación se describe en la Figura 10, la macro red HVDC se representa como una red de 14 sistemas HVDC punto a punto, como se representa en la Figura 11. Debido a la complejidad de modelar una macro red HVDC a lo largo de grandes sistemas AC, se usan modelos de flujos de potencia HVDC y modelos dinámicos de estado cuasi

estable (QSS) ampliamente utilizados para estudios de planificación. Se asume que la macro red HVDC es un conjunto de modelos de línea de conversores de línea conmutada o fuente de corriente (LCC).

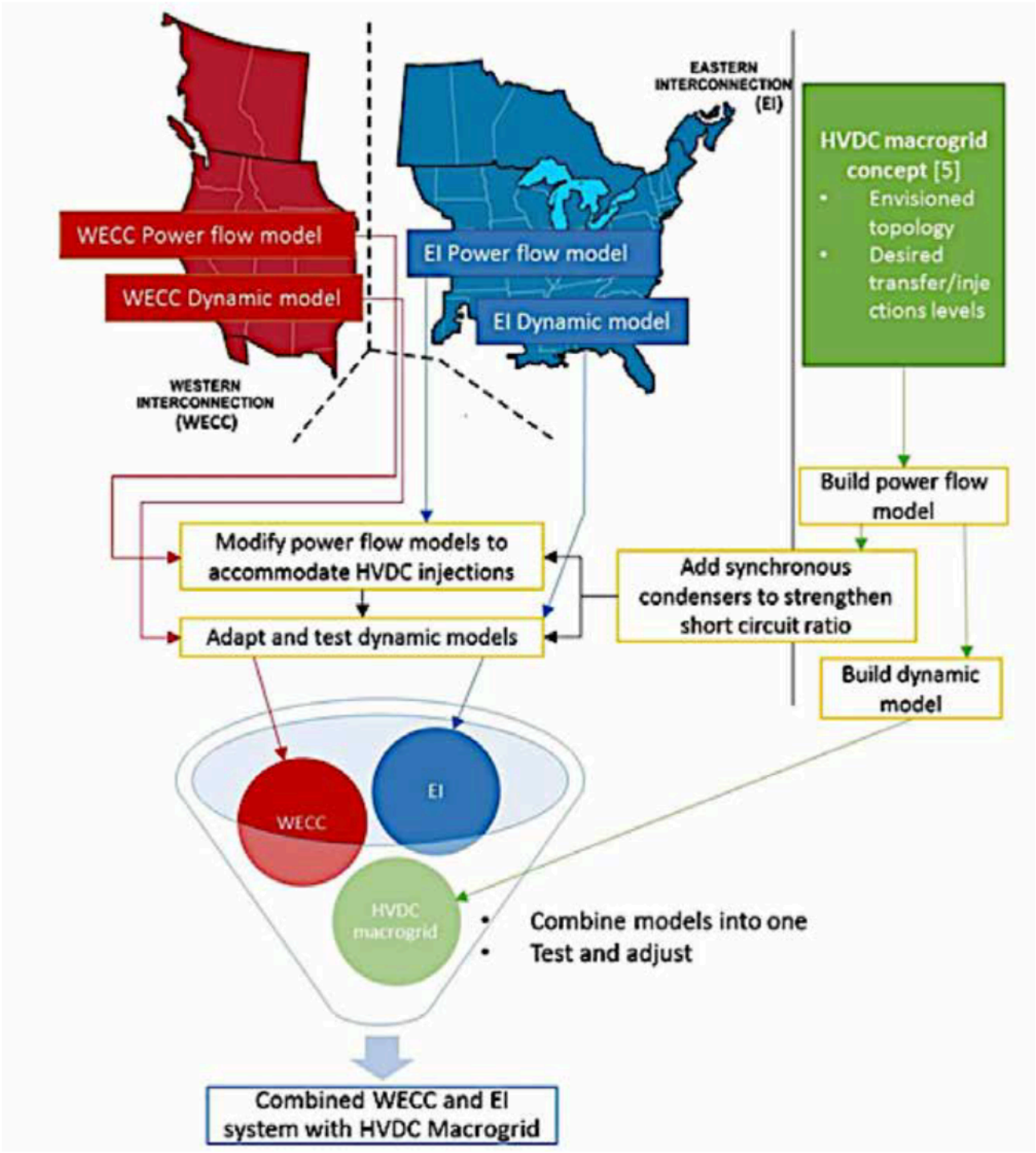


Fig. 10.

Proceso de modelación para construir el flujo de potencia a nivel continental y modelos dinámicos combinando la Interconexión del Este, Interconexión del Oeste y una macro red HVDC dentro de un solo modelo [10]

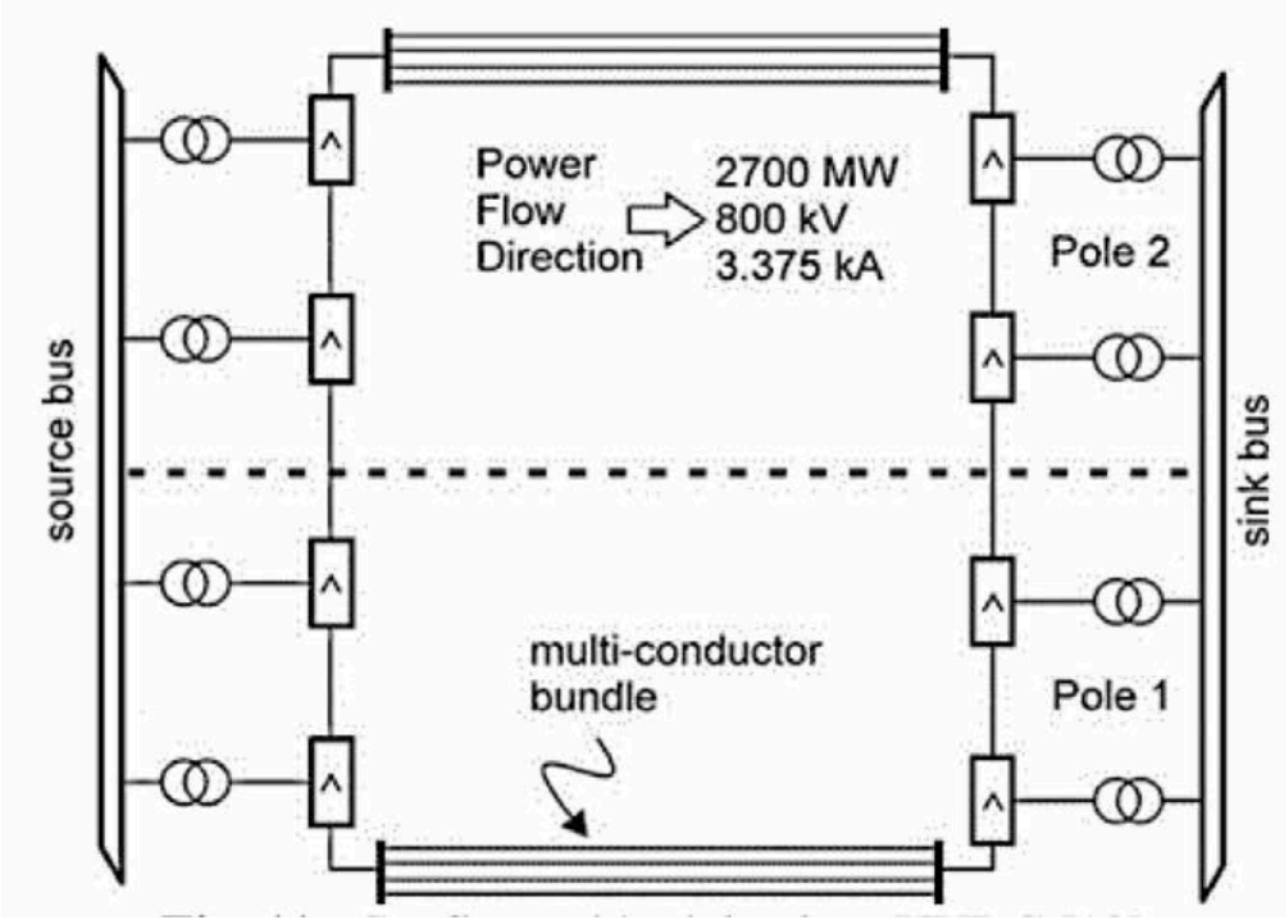


Fig. 11. Configuración del enlace HVDC [10]

Características de las simulaciones y estudios

En [11], se propone una plataforma general para el análisis de la dinámica de sistema de potencia con enlaces de transmisión HVDC. Estabilidad de pequeña señal, estabilidad de voltaje y fenómenos de interacción de sistemas de potencia con modelos de conversor de línea conmutada (LCC-HVDC) y conversor de fuente de voltaje (VSC-HVDC) son usados en la plataforma propuesta. En esta plataforma el sistema de potencia se modela como un sistema de control de retroalimentación multivariable (FCS por sus siglas en inglés) que consiste de tres bloques interconectados como se observa en la Figura 12.

Las entradas y salidas de los bloques son seleccionadas de manera que las herramientas de análisis convencional para estabilidad de sistemas de potencia sean aplicables, en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

En este modelo la relación entre diferentes inestabilidades es claro y los agentes participantes de cada inestabilidad puede ser identificado. Este modelo se desarrolló en forma modular e híbrida, para que pueda ser aplicado a grandes sistemas de potencia.

En el primer bloque K se ubican los modelos de espacio de estado de todos los controladores HVDC y partes mecánicas de las máquinas eléctricas. Los modelos de los conversores HVDC, enlaces DC, cargas y partes eléctricas de las máquinas están incluidas en el bloque I; y el modelo de la red AC se considera en el bloque N. Se realizan simulaciones en el dominio del tiempo en el sistema de prueba IEEE-9 barras incluyendo enlaces HVDC que se muestra en la Figura 13, para validar el modelo FCS.

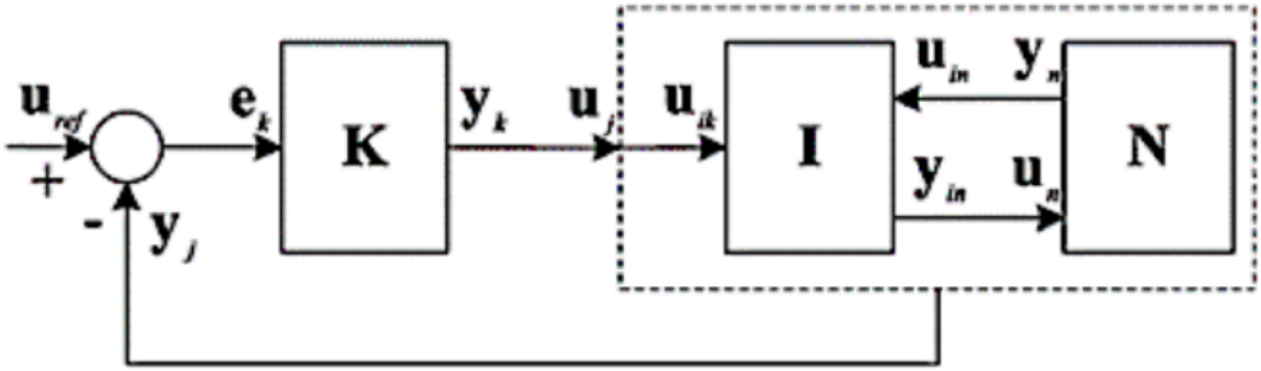


Fig. 12. Diagrama de bloques del sistema de control de retroalimentación multivariable [11]

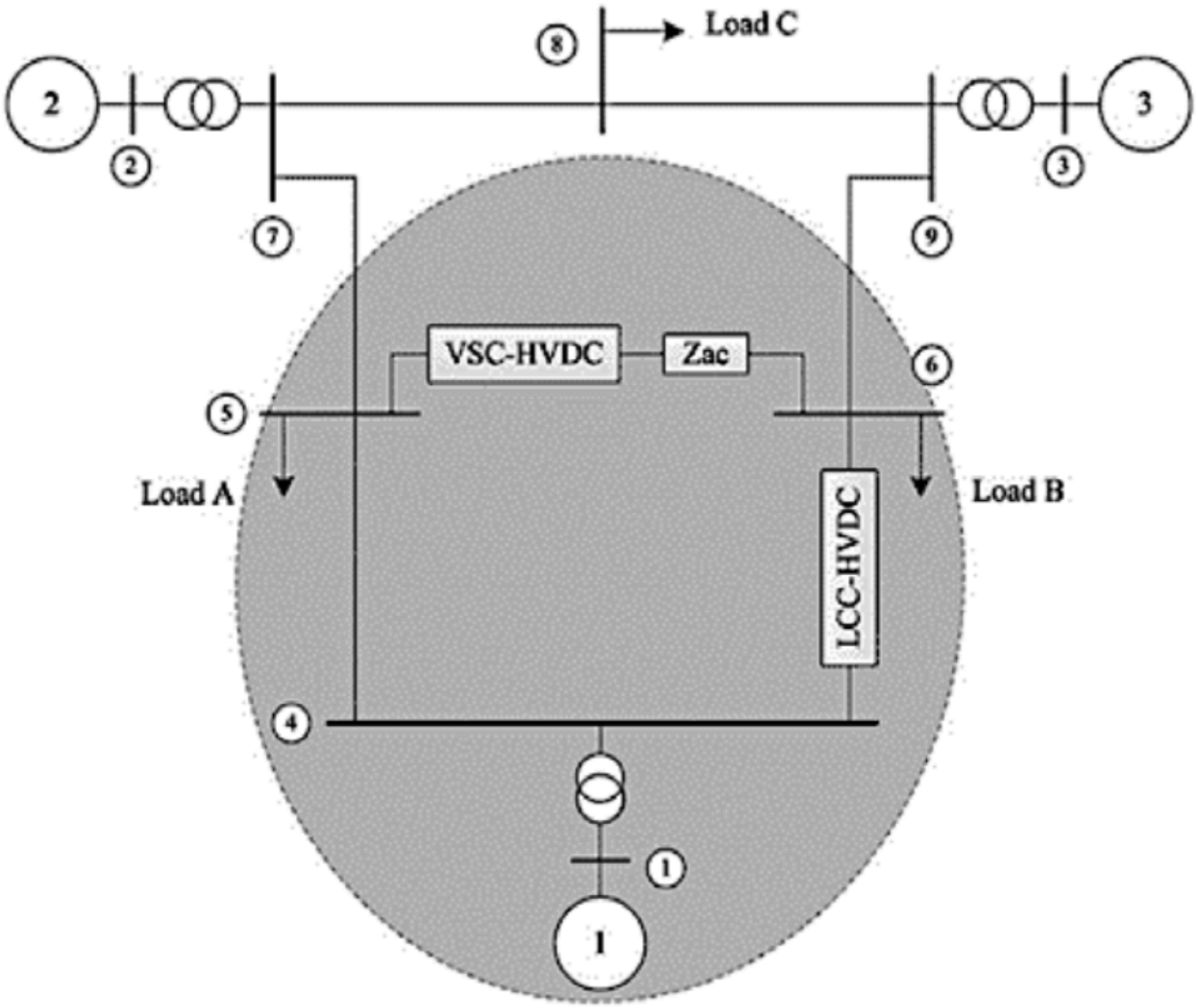


Fig. 13. Sistema de prueba IEEE-9 barras con enlaces HVDC [11]

En [12], se introducen técnicas en simulación digital de tiempo real para pruebas de lazo cerrado de sistemas HVDC. Se incluyen cuatro modelos: un modelo de grupo de válvulas LCC HVDC, un modelo de conversor multinivel modular (MMC HVDC), un modelo de líneas de transmisión dependiente de la frecuencia y un modelo de filtro conmutable.

En la Figura 14 se ilustra el modelo de grupo de válvulas de 12 pulsos para ser usado en un simulador digital de tiempo real (RTDS por sus siglas en inglés); este modelo está diseñado para mejorar la eficiencia y calidad de la simulación en RTDS. El modelo MMC se ilustra en Figura 15 y Figura 16, la Figura 15 muestra una válvula MMC conteniendo unos pocos submódulos de medio puente, en la Figura 16 se ilustra una red sustituta para una válvula que contienen submódulos de medio puente. La red sustituta facilita la eficiencia de la simulación en tiempo real de válvulas MMC con gran cantidad de submódulos, cada submódulo contiene dos o cuatro pares de diodos IGBT/black.

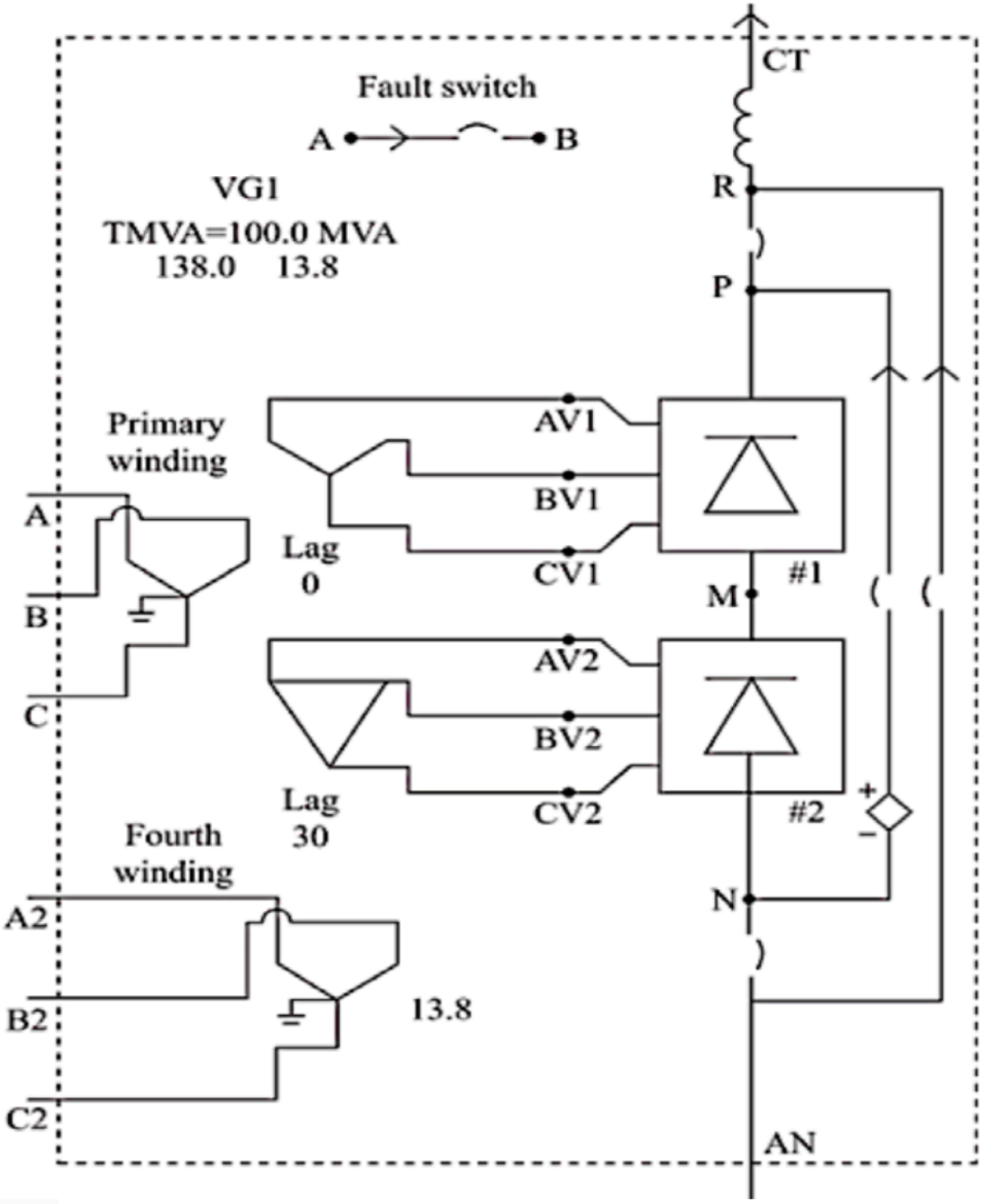


Fig. 14. Grupo de válvulas de 12 pulsos [12]

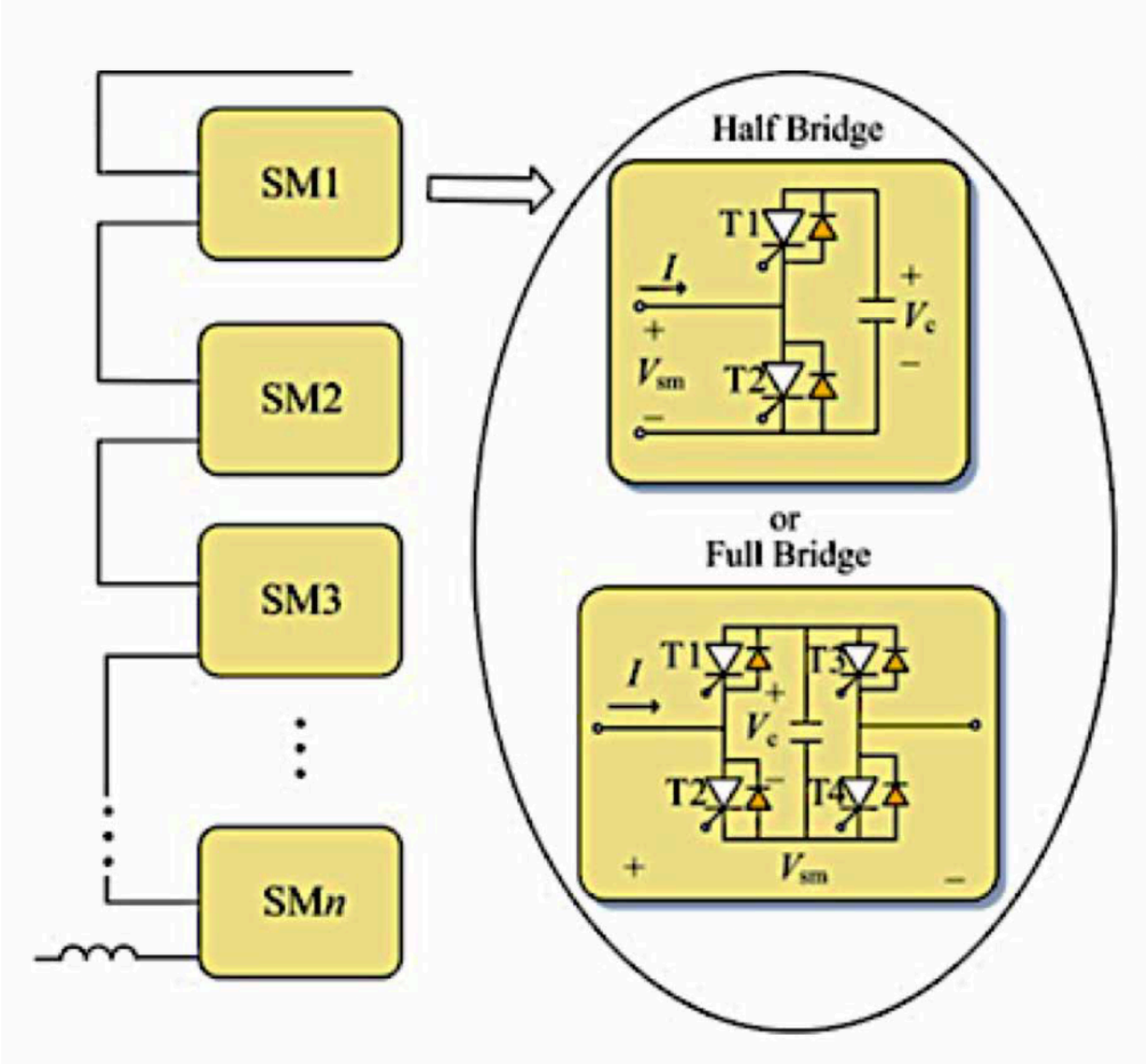


Fig. 15. Válvula MMC de medio puente [12]

En [13], un modelo de referencia de una red DC se propone como una plataforma de estudio para investigadores para comparar el rendimiento y características de diferentes funciones de control DC y estrategias de protección. Este modelo sirve para realizar estudios de flujos de potencia de dos sistemas AC interconectados mediante un enlace DC. Estos sistemas AC pueden ser entre regiones, países o continentes con o sin energía renovable. Los enlaces HVDC del modelo propuesto son: modelos DC mallados, convertidor de línea conmutada (LCC- HVDC) y sistemas multiterminal DC (MTDC).

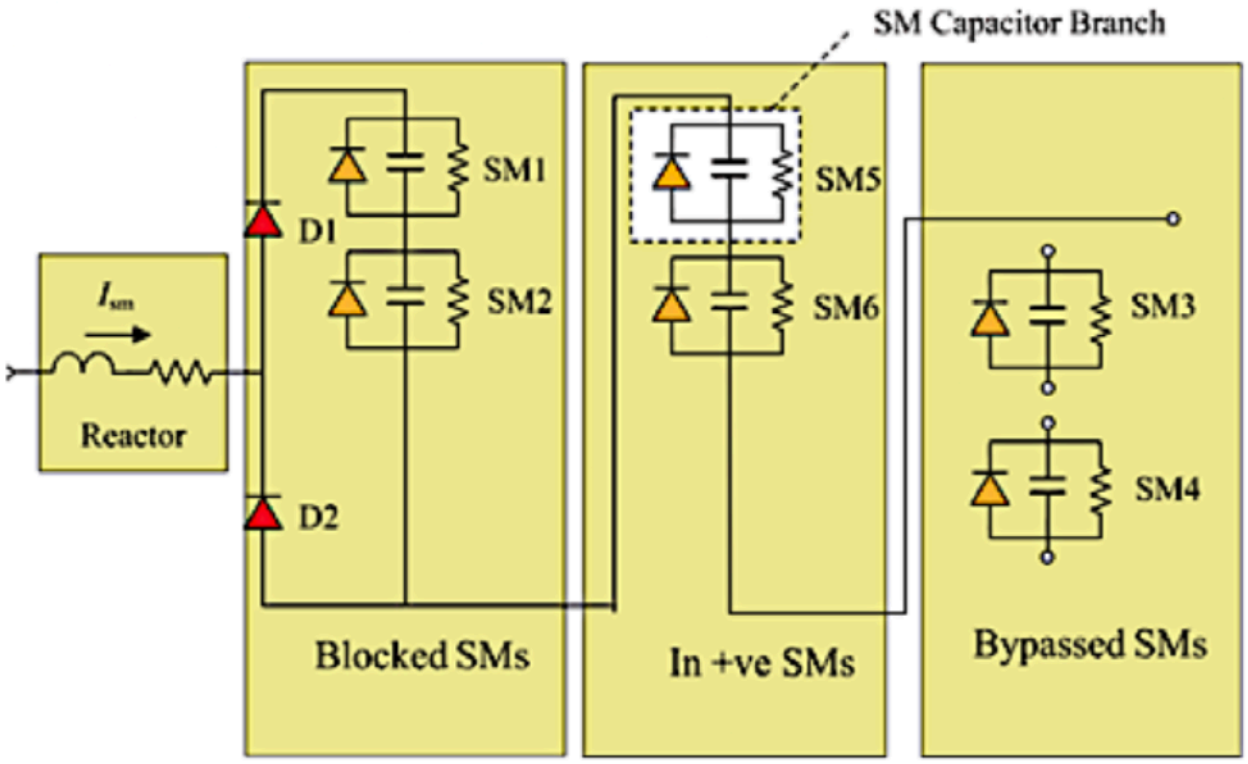


Fig. 16. Topología de la red sustituta de medio puente [12]

En [14,] se presenta un nuevo modelo RMS de un enlace de conversor de fuente de voltaje (VSC-HVDC) para simulaciones dinámicas de grandes sistemas de potencia. Se evalúa la efectividad del modelo propuesto para regular la magnitud de voltaje en ambos terminales del sistema AC, seguido de un cambio de potencia de la red, así como un cambio en la carga del sistema o el disparo de una línea de transmisión o transformador.

En [15], un modelo de estabilidad transitoria restringido con flujo óptimo de potencia (TSC-OPC por sus siglas en inglés) se propone y aplica a un caso real offshore. El modelo propuesto retiene la dinámica de los generadores e incluye una representación de los enlaces HVDC en el lado del inversor. Este modelo de optimización no lineal es usado para evaluar el impacto económico del HVDC en los costos de generación del sistema analizado usando TSC-OPF y OPF tradicional en el despacho.

Diferentes patrones de recuperación del enlace HVDC después de una falla severa en la red de transmisión son evaluados desde el punto de vista del costo y estabilidad de la generación. Para el modelo propuesto se usa un modelo de conversor de línea conmutada (LCC-HVDC) para los enlaces DC. El modelo propuesto TSC-OPF hace posible incluir restricciones de estabilidad transitoria en el despacho económico.

El modelo permite identificar patrones de recuperación del enlace HVDC después de fallas severas en el costo de generación. Este enfoque simplifica el estudio que involucra costos de generación, restricciones estáticas y dinámicas y control de potencia.

En [16], se propone un modelo genérico RMS de conversor de fuente de voltaje (VSC) en un conversor modular multinivel (MMC por sus siglas en inglés) para aplicaciones HVDC. El modelo que se propone representa el comportamiento de MMC-VSC en estabilidad transitoria interconectado a sistemas AC. Mientras que en [17], se investigan la dinámica

de varios modelos mixtos AC/DC enfocándose en diferentes órdenes de generadores y tipos de modelos de conversores modulares de múltiples niveles (MMC) VSC-HVDC. En [18], se plantea la colocación óptima de limitadores de corriente de falla (FCL) para obstruir la propagación de fallas segmentando dinámicamente a la red mejorando la estabilidad de los sistemas AC/DC.

Un problema importante es la falta de inercia debido al uso de electrónica de potencia para energía renovable. En [19], se propone habilitar el soporte VSC-HVDC que emula la inercia de generadores sincrónicos para mejorar la estabilidad de frecuencia. También esto puede ser mejorado a través de un control de amortiguamiento para sistemas VSC-HVDC que puede suprimir la inestabilidad de la red DC [20]. La falta de inercia también se puede solucionar a través del desarrollo de inercia virtual en sistemas multi-área. En [21], se propone un método basado en la estrategia de control de la potencia síncrona virtual (VSP) de los sistemas HVDC.

En estos sistemas también es necesario el entendimiento del efecto de los sistemas HVDC sobre el sistema eléctrico de potencia. Para ello es necesario el desarrollo de modelos adecuados de acuerdo al tipo de análisis, ya sea estado transitorio, estable, dinámico o casi dinámico. Considerando esto, en [22], se evalúan casos de estudio para análisis de estabilidad de pequeña señal en un sistema de prueba de múltiples terminales HVDC. Se evalúa la estabilidad de pequeña señal para identificar modos críticos en diferentes partes de sistemas AC/DC interconectados.

Conclusiones

- La complejidad de los sistemas HVDC se evidencia en la gran cantidad de modelos, simulaciones y controles propuestos para resolver distintos problemas de sistemas AC/DC interconectados relacionados con el control de los dispositivos electrónicos asociados y nuevas tecnologías desarrolladas a lo largo de los años, con el objetivo de que estos enlaces sean factibles técnicamente. Por esa razón se necesita un modelo para análisis de sistemas de transmisión AC interconectados con enlaces HVDC que permita evaluar flujos de potencia y estabilidad, así como incorporar las nuevas tecnologías de sistemas HVDC.

- Los modelos de conversores HVDC más utilizados son tipo fuente de corriente (LCC) y tipo fuente de voltaje (VSC), estos modelos son integrados dentro de redes mixtas AC/DC para analizar flujos de potencia y estabilidad. Los enlaces con conversores tipo VSC son los de mayor desarrollo en la actualidad, debido a que estos conversores no necesitan de un banco de capacitores para suministrar la potencia reactiva necesaria para el funcionamiento del enlace en condiciones normales; y en condiciones de falla para recuperar el voltaje en el lado del inversor sin que se produzcan problemas de estabilidad de voltaje y por consiguiente fallas de conmutación.

- Los modelos HVDC, los controles y los métodos de simulación en sistemas mixtos AC/DC son numerosos y complejos, este trabajo tiene como objetivo ser una guía que permita reducir el tiempo en la revisión del estado del arte de esta tecnología.

- La tecnología HVDC es cada vez más utilizada por las ventajas que presenta como la transmisión de grandes cantidades de potencia a largas distancias, conectar sistemas asíncronos, introducir gran cantidad de energía renovable a redes AC y aislar la dinámica de la red AC, sin embargo los componentes electrónicos asociados

a estos enlaces y su interacción con la red AC presenta problemas asociados a la estabilidad de la red AC/DC mixta, el presente trabajo sirve como una herramienta eficaz para abordar esta temática y conocer las soluciones planteadas actualmente en diferentes investigaciones.

Referencias

Sood, V. K., (2011). HVDC transmission, 4th ed. Elsevier Inc.

Banco de Desarrollo de América Latina - CAF y Comisión de Integración Energética Regional - CIER, Nuevas oportunidades de Interconexión eléctrica en América Latina. 2012.

Zhaoqing, H., Chengxiong, M., and Jiming, L., (2005) "Improvement of transient stability in AC system by HVDC Light," 2005 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Asia Pacific, vol. 41, no. 3, pp. 5–9.

Huang, H., Xu, Z., Wang, W. and Wang, C. (2010) "Transient stability analysis of Shanghai power grid with multiple HVDC links," in 2010 International Conference on Power System Technology: Technological Innovations Making Power Grid Smarter, POWERCON2010, pp. 1–6.

Liu, Y. and Chen, Z., (2011) "Transient voltage stability analysis and improvement of a network with different HVDC systems," in IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–8.

Oyedokun, D. T. and Folly, K. A., (2011) "Network transient responses to varying HVAC line length along a HVDC transmission corridor," in IEEE AFRICON Conference, no. September, pp. 13–15.

Jun, Z., Liu, C. and Zhao, J., (2016) "Transient and dynamic stability enhancement by coordination control of HVDC links of northwest ac\dc grid," in China International Conference on Electricity Distribution, CICED, vol. 2016–Septe, no. Ciced, pp. 10–13.

Zhu, H., Cai, Z., Liu, H., Qi, Q. and Ni, Y., (2006), "Hybrid-model transient stability simulation using dynamic phasors based HVDC system model," Electr. Power Syst. Res., vol. 76, no. 6–7, pp. 582–591.

Shu, D., Member, S., Xie, X., Member, S., Dinavahi, V., and Member, S., (2017), "Dynamic Phasor Based Interface Model for EMT and Transient Stability Hybrid Simulations," vol. 8950, no. c, pp. 1–10.

Elizondo, M. A. et al., (2017), "HVDC macrogrid modeling for power-flow and transient stability studies in north american continental-level interconnections," CSEE J. Power Energy Syst., vol. 3, no. 4, pp. 390–398.

Bidadfar, A. et al., (2016), "Power system stability analysis using feedback control system modeling including HVDC transmission links," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 1, pp. 116–124.

Zhang, Y., Member, S. Ding, H. and Kuffel, R., (2017), "Key Techniques in Real Time Digital Simulation for Closed- loop Testing of HVDC Systems," vol. 3, no. 2, pp. 125– 130.

An, T., Zhou, X., Han, C. and Wu, Y., (2015), "A DC Grid Benchmark Model for Studies of Interconnection of Power Systems," CSEE J. Power Energy Syst., vol. 1, no. 4, pp. 101–109.

Castro, L. M., Acha, E., and Fuerte-Esquivel, C. R., (2015), "A novel VSC-HVDC link model for dynamic power system simulations," Electr. Power Syst. Res., vol. 126, pp. 111– 120.

Castronuovo, E. D., Ledesma, P., and Calle, I. A., (2015), "Advanced application of transient stability constrained-optimal power flow to a transmission system including an HVDC-LCC link," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 9, no. 13, pp. 1765–1772.

Trinh, N., Member, S., Zeller, M., Wuer, K., Erlich, I., and Member, S., (2016), "Generic Model of MMC-VSC-HVDC for Interaction Study With AC Power System," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 1, pp. 27–34.

Mochamad, R. F. and Preece, R., (2017), "Impact of Model Complexity on Mixed AC/DC Transient Stability Analysis," 13th IET Int. Conf. AC DC Power Transm. (ACDC 2017), p. 24 (6.)-24 (6.).

Huang, H., Xu, Z., and Lin, X., (2012), "Improving performance of multi-infeed HVDC systems using grid dynamic segmentation technique based on fault current limiters," IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 3, pp. 1664–1672.

Rodrigue, J. R. et al., (2013), "Inertia Emulation Control Strategy for VSC-HVDC Transmission Systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1277–1287.

Li, Y. et al., (2018), "Modeling and Damping Control of Modular Multilevel Converter Based DC Grid," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 1, pp. 723–735.

Rakhshani, E., Remon, D. Cantarellas, A. M., Garcia, J. M., and Rodriguez, P., (2016), "Modeling and sensitivity analyses of VSP based virtual inertia controller in HVDC links of interconnected power systems," Electr. Power Syst. Res., vol. 141, pp. 246–263.

Li, Y. et al., (2017), "Power compensation control for interconnection of weak power systems by VSC-HVDC," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 4, pp. 1964–1974.



Prótesis de mano para personas con amputación transcarpiana

Javier Higa[1], Alexander Naar[1], Brizeida Ojeda[2]
[1] Especialización en Mecatrónica, Universidad Arturo Michelena,
Av. Giovanni Nani, San Diego, Estado Carabobo, Venezuela
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica, EAFIT
Carrera 49 N° 7 Sur 50, Medellín, Colombia
[1]javierhiga@gmail.com, [1]alexnaar@msn.com, [2]bojedag@eafit.edu.co

RESUMEN

En la actualidad es muy común el uso de prótesis de mano estéticas; sin embargo, la funcionalidad de estas es prácticamente nula, razón por la cual el paciente amputado no consigue el desenvolvimiento normal en las tareas cotidianas. Las prótesis funcionales requieren una gran inversión económica. A continuación, se presenta el diseño mecánico de una prótesis de mano derecha, proyectada para que funcione a partir de señales mioeléctricas. Para lograr el modelo protésico se consideraron las fases de diseño de la palma, dedos la selección del sistema motriz y la validación del modelo, empleando el programa Autodesk Inventor para llevar a cabo las simulaciones respectivas empleando el Método de Elementos Finitos. Como resultado se obtuvo un modelo de prótesis de mano derecha con la capacidad de ejecutar las tareas de pinza fina y pinza gruesa, así como los movimientos de flexión y extensión en ángulos naturales del miembro.

Palabras Clave: Prótesis de Mano, Diseño Mecánico, Método de los Elementos Finitos.

ABSTRACT.

It is very common to use cosmetic hand prostheses. However, these devices have poor functionality, therefore the amputated patient does not get normal development in everyday tasks. It is important to remark that these prostheses are very expensive. This work proposes the right-hand mechanical design for a patient with wrist disarticulation to be controlled using myoelectric signals. Some mechanicals designs phases where considered; first the palm, second the fingers, third the motor system and fourth the solution validation using the finite element method (Inventor-Autodesk software). The results indicate that solution have the capacity to make the basic fingers movements, such as: flexion-extension.

Keywords: Hand Prosthesis, Mechanical Design, Finite Element Method, Wrist disarticulation.

Introducción

En Venezuela, una porción de la población sufre de ausencia de una de sus extremidades, ya sea por defectos genéticos o accidentes que han ocasionado amputación de uno de los miembros del cuerpo [1]. La falta de una de las manos en un ser humano representa una limitación circunstancial para el desempeño de actividades dentro del entorno social y laboral, por tal motivo, una persona puede verse afectada psicológica y socialmente [2]. Uno de los principales problemas mencionados por los usuarios de prótesis de miembros superiores, es la poca similitud de éstas en relación con el miembro natural [3]. La mano cumple un papel primordial en el desempeño de una persona, permitiendo la manipulación de objetos en el entorno que lo rodea.

El desarrollo de una prótesis robótica de bajo costo constituye una solución social que representa un adelanto para el porcentaje de la población que se ve imposibilitada a desarrollar tareas comunes en la sociedad [4]. Esta prótesis traerá beneficios a los pacientes que adolecen de este tipo de discapacidad, tales como: aumento de su autoestima, inclusión dentro de la sociedad; disminución de la dependencia económica con sus familiares; todo esto basado en el incremento de las posibilidades de integración al campo laboral. Las prótesis de mano funcionales se basan en diversos principios, siendo la utilización de impulsos mioeléctricos del propio cuerpo uno de los más utilizados en los últimos años. Iglesias y otros, en 2020 [5], describieron el proceso de diseño de cuatro estrategias de control clásicas, para el control de la posición angular de una articulación de tobillo, durante las fases de marcha humanas. Para ello, diseñaron las estrategias de control que permitieron analizar el comportamiento de la articulación. Erazo y otros (2004) [6] plantean la técnica de Diseño para la Manufactura (DFMA) para optimizar el diseño de una prótesis externa de rodilla con el objeto de minimizar el costo y peso del aparato. Es importante realizar una armonía entre un diseño funcional para prótesis de mano y un sistema de captura de señales mioeléctricas con su respectivo control de movimiento minimizando la cantidad de actuadores sin disminuir la operatividad de esta; esto con el propósito de disminuir el costo por unidad como una alternativa de solución social [2].

El objetivo de desarrollar un aparato protésico de miembro superior se basa en ofrecer la posibilidad de rehabilitación al paciente, esto es, suplir de la mejor manera la función pérdida; por lo tanto, el trabajo para el desarrollo de una prótesis involucra un equipo interdisciplinario que considere todos los aspectos relacionados con la amputación desde el momento en que ocurre, al igual que los conceptos de todas las personas involucradas en el proceso de amputación, rehabilitación, construcción de la prótesis y adaptación del paciente. A continuación, se presentan los resultados de la fase de diseño mecánico de un modelo de prótesis de mano derecha para una persona adulta, tomando en consideración las características antropométricas determinadas por Ávila y otros en 2007 [7], generada en función de incluir en el futuro funcionalidad a partir de impulsos mioeléctricos del paciente.

Metodología

Con el propósito de generar un modelo que pueda satisfacer las necesidades de un usuario, se propone una prótesis para mano derecha, anatómica que permita la instalación de un sistema de control en la mano y en su accionamiento sea capaz de levantar piezas cilíndricas mediante la acción de una pinza gruesa. El diseño ofrece la posibilidad del uso de un motor único para la mano, y la implementación de materiales de bajo peso.

Para desarrollar el modelo protésico se llevó a cabo el desarrollo del diseño mecánico que incluye todos los aspectos de diseño de los dedos y palma de la mano, selección e integración del sistema motriz y validación del modelo empleando un programa basado en el Método de Elementos Finitos.

Diseño de los dedos

El diseño de los dedos se enfoca a imitar al dedo humano, para ello consideraron las medidas antropométricas, los esfuerzos aplicados en cada articulación, los materiales a utilizar y el peso que representaría cada uno de los dedos. Se propone la transmisión de los movimientos mediante el uso de guayas, lo cual permitirá una mayor flexibilidad al momento de coordinar la extensión y flexión de todos los dedos, para ello se plantea un sistema basado en la utilización de tendones artificiales. En la Fig. 1 se muestra el modelado de los cinco dedos de la mano. De derecha a izquierda se observa los dedos pulgar, índice, medio, anular y meñique.

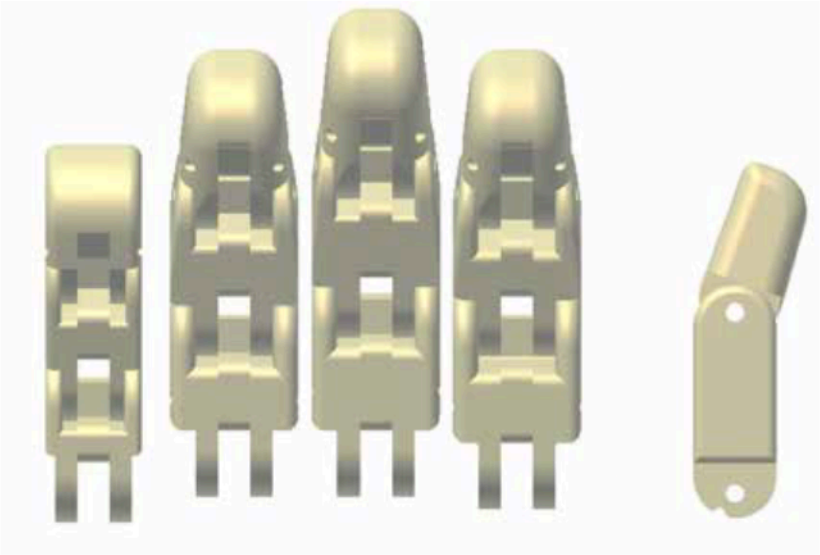


Fig. 1. Diseño y modelado de los cinco dedos de la mano

Diseño de la palma de la mano

La palma de la mano se diseñó en base a que el sistema motriz estará instalado en la misma, basado en una estrategia de bajo costo y considerando que la prótesis pueda ser utilizada por una mayor cantidad de personas sin importar la altura de la amputación. Esta importante premisa conllevó a la búsqueda de una solución que permita instalar un motor servo en la palma sin obstaculizar el movimiento de los dedos. En la Fig. 2 se observa la vista anterior, posterior y lateral de la palma diseñada.

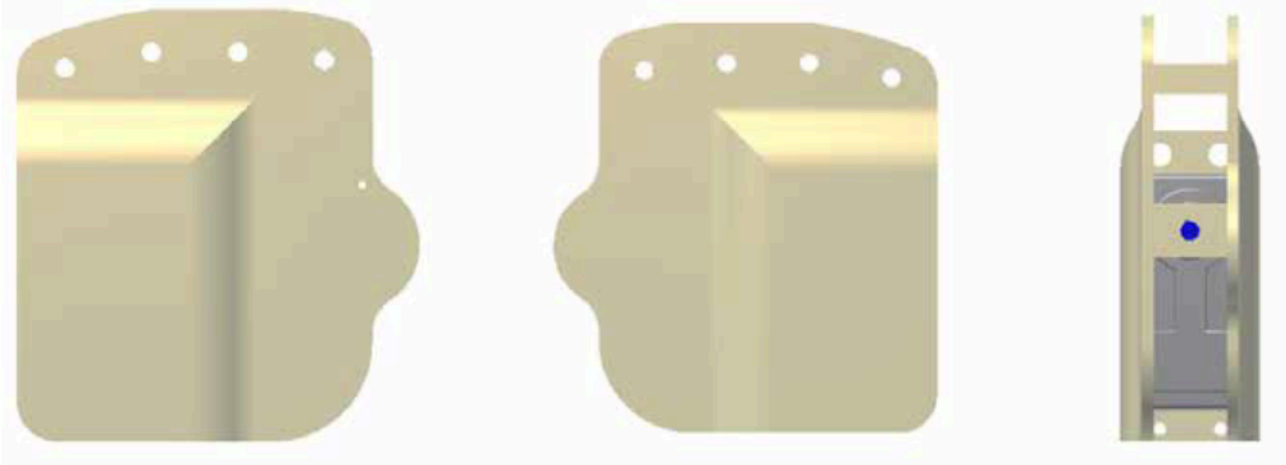


Fig. 2. Diseño y modelado de la palma de la mano integrada con servomotor.

Selección e integración del sistema motriz

Basado en las medidas antropométricas de la palma de la mano, se utilizan las herramientas CAD para efectuar una iteración que permita seleccionar el motor servo que mejor se adapte a las especificaciones dimensionales. Para este caso específico se ha seleccionado un servo-motor AAS-850MG de la marca ALTURN. En la Fig. 3 se muestra la palma integrada con el servo-motor.

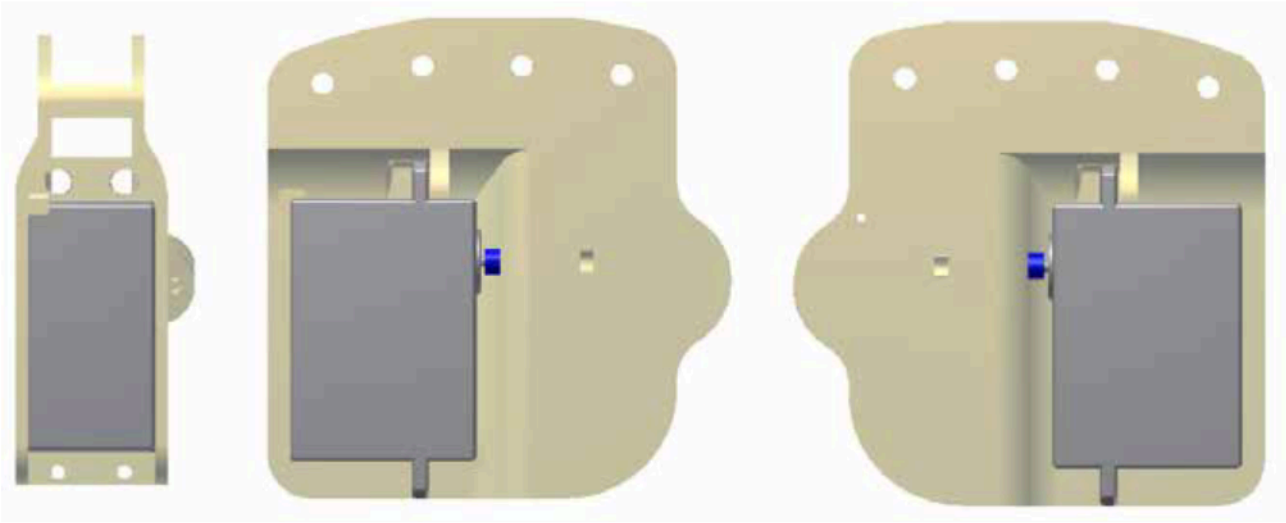


Fig. 3. Diseño y modelado de la palma de la mano integrada con servomotor.

Ensamblaje del modelo

Para el empalme de los dedos índice, medio, anular y meñique, se desarrolló una unión que permite el acople perpendicular y la capacidad de rotación para las actividades de flexión y extensión de los dedos, ver Fig. 4.

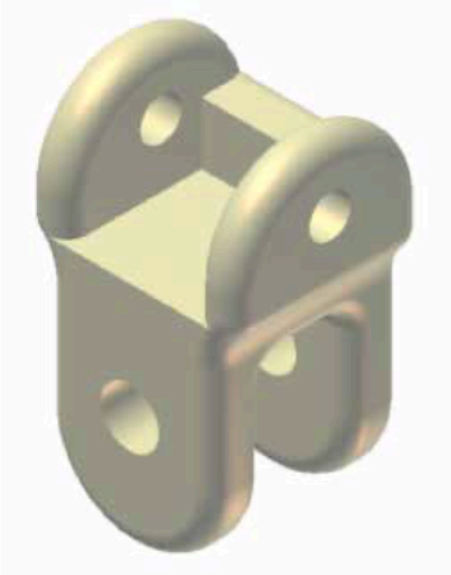


Fig. 4. Modelado de la unión dedo-palma

En base la figura 4, dicha unión emulará la articulación entre los Metacarpianos y las Falanges Proximales; esta articulación estará sometida a un torque mayor en comparación con las demás articulaciones, por ende, su diseño será el más robusto entre todas las articulaciones y estará enfocado a soportar el torque total resultante en cada dedo. Como estrategia de ahorro de costos, se diseñó una pieza estándar para cualquier dedo tri-falángico (Índice, Medio, Anula y Meñique). En el caso particular del dedo pulgar, la unión será integrada directamente a la palma de la mano para brindarle un mayor soporte, considerando que dicho dedo es elemental para la función de una pinza gruesa y fina. En la Fig. 5 se muestra el ensamblaje del modelo protésico.

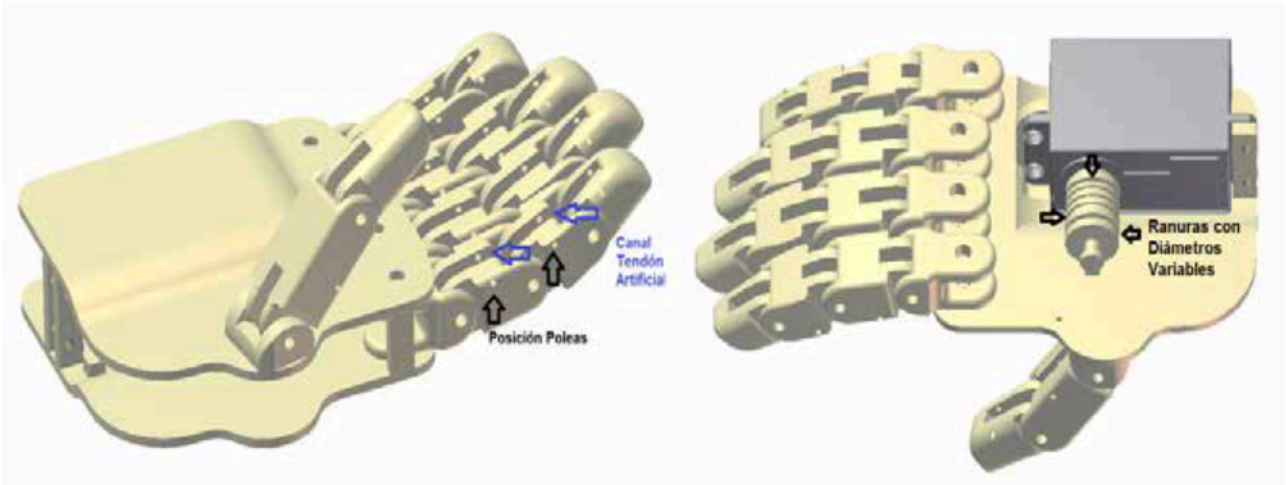


Fig. 5. Ensamblaje de la mano (ver detalles de canalización de tendones en dedos)

Para llevar a cabo el movimiento de flexión y extensión se utilizan tendones artificiales debidamente encausados desde el motor servo hasta la punta de cada dedo. La flexión es producida por la transmisión de una fuerza de tensión encausada por un tendón artificial hasta la punta de cada dedo; la acción inversa a este movimiento es la extensión, en donde cada dedo debe retornar a su posición original para realizar una acción determinada. El sistema para efectuar el movimiento de flexión en la prótesis es rígido, lo que se traduce en que sólo permite la acción motora en una sola dirección. El torque del motor servo se utilizará únicamente para cerrar la mano, lo cual brindará el torque en cada articulación para efectuar tareas de rutina diaria. Para que cada dedo retorne a su posición original, cada articulación debe tener la acción de un momento con sentido opuesto al inducido por el motor servo. Adicionalmente, se diseñó un sistema mecánico que limita el ángulo de apertura de la mano, esto con la finalidad de: evitar una extensión de los dedos fuera de los parámetros anatómicos; y asegurar un ángulo de favorable al momento de iniciar el proceso de cierre de la prótesis (flexión), ver Fig. 6.

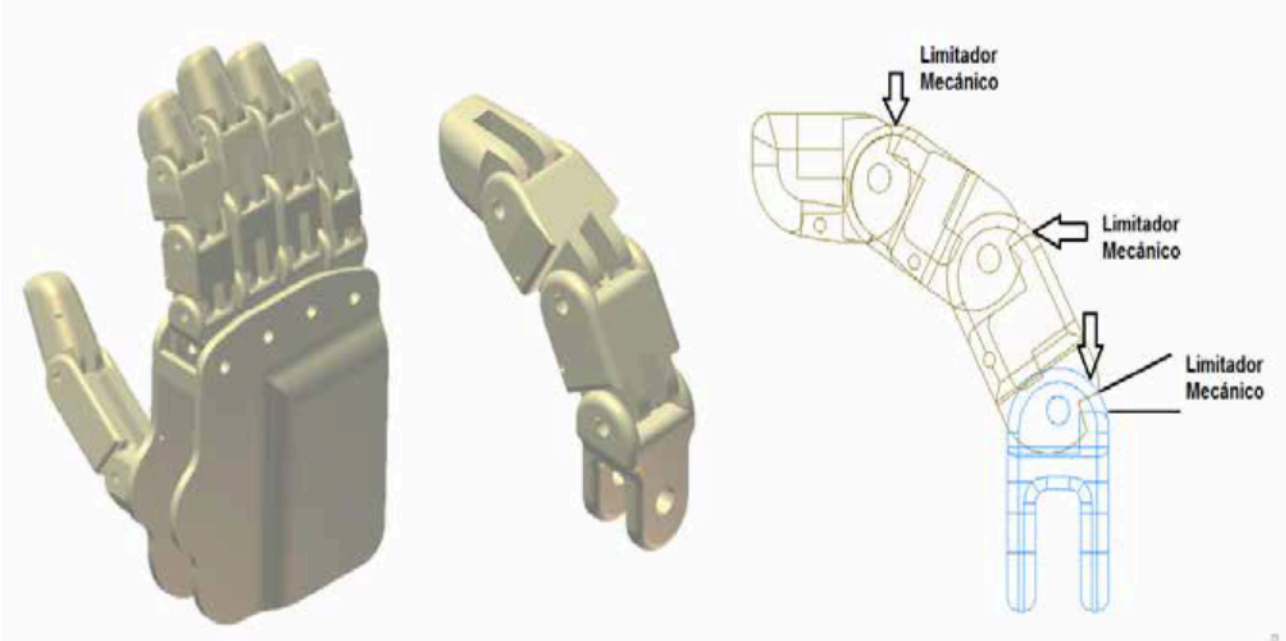


Fig. 6. Modelado del limitador mecánico de la flexión.

Posterior a la modelación y desarrollo de los limitadores de ángulos, mediante el uso de la herramienta CAD se calculan los pesos de cada falange, ver tabla 1, con el propósito de diseñar los resortes de torsión que permitirá a cada dedo retornar a la posición inicial de reposo o de extensión completa. El peso de diseño a considerar para el resorte será el correspondiente al dedo más pesado sin incluir la Articulación MP (17,781 gramos).

Validación del modelo

Cada elemento diseñado para la prótesis corresponde un punto clave para su respectivo funcionamiento, por ende, se debe garantizar que no existan puntos que puedan sufrir fallas al momento de utilizarla. Para el caso de la prótesis, se evalúan los diversos usos a la cual puedan estar sometidas las piezas para determinar la condición crítica del diseño. Para la validación del diseño en todos los dedos, se emplea una fuerza de 311,70 N [8] en la punta de la falange distal de todos los dedos de la mano (véase Fig. 7). De igual forma, se establece de acuerdo a los diversos estudios realizados que la situación más crítica para la mano es cuando una persona ejerce una acción de empuje o halado con la mano

extendida tomando en cuenta las sugerencias de Bejarano y Barrera [9], quienes presentan una solución funcional, cosmética e individualizada para un paciente con amputación de la mano a través del uso de la función de calidad, (Quality Function Deployment - QFD), con el propósito de realizar cambios y mejoras en los mecanismos y sistemas de sujeción propuestos. Con base a lo anteriormente expuesto, se realiza la corrida del modelo utilizando un software CAD-CAE para verificar los resultados.

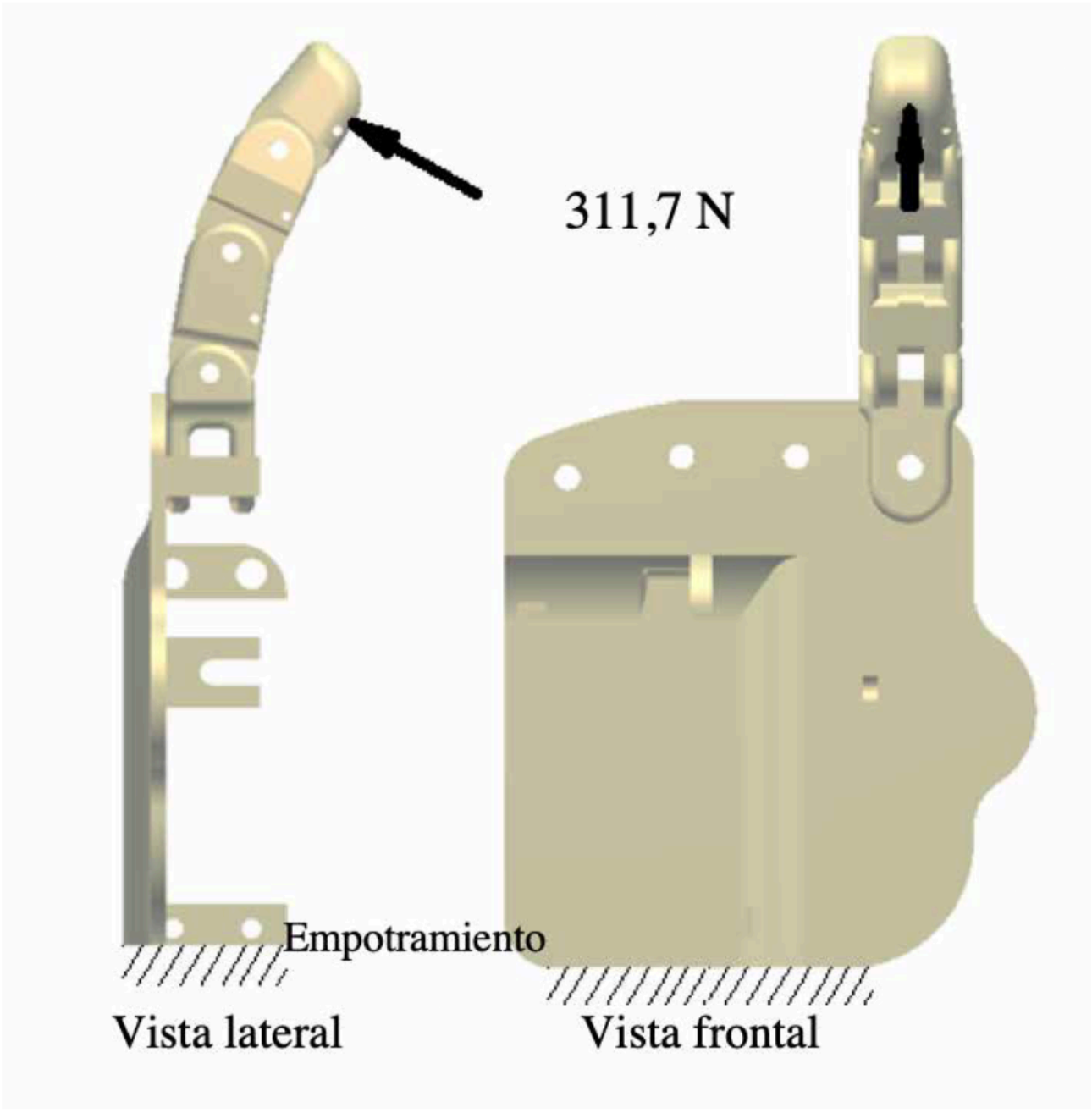
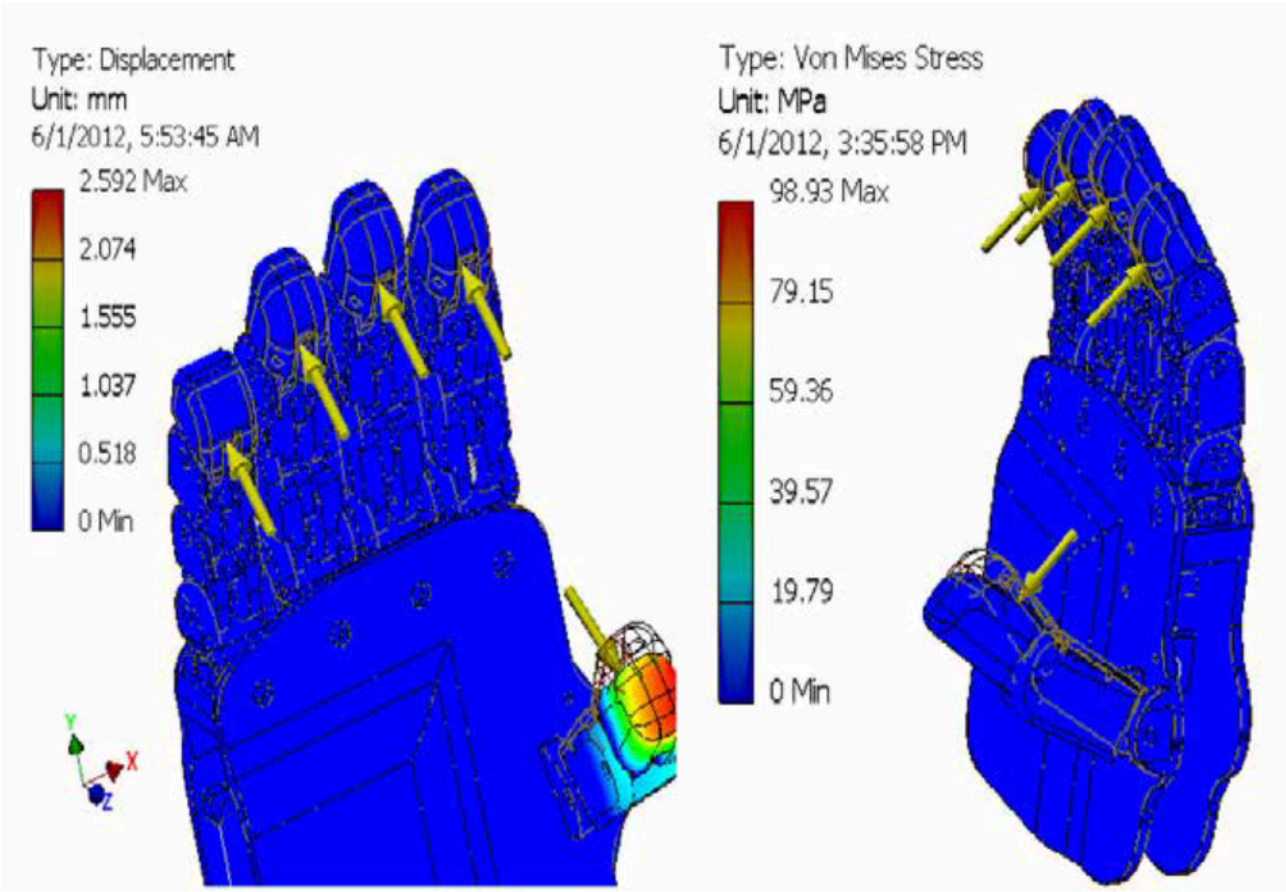


Fig. 7. Condiciones de contorno del modelo.

Tabla 1. Peso de cada falange

Peso en gramos	*Articulación MP*	*Falange Proximal*	*Falange Media*	*Falange Distal*	*TOTAL (g)*
Dedo Índice	5,86	7,223	6,178	4,73	23,991
Dedo Medio	5,86	7,509	7,004	5,268	25,641
Dedo Anular	5,86	6,358	6,293	4,73	23,241
Dedo Meñique	5,86	3,804	4,082	3,874	17,62
Dedo Pulgar	-	-	12,05	7,239	19,289

Se utiliza el software AutoDesk Inventor ® para la determinación de los desplazamientos y esfuerzos, considerando la condición de borde establecida en la Fig. 7. Una vez que se ejecutan las corridas se puede observar en la Fig. 8, la prótesis de mano diseñada soporta un esfuerzo máximo de 98,93 MPa, o mejor dicho que los dedos pueden soportar una carga de 311,70 N. Considerando al aluminio 7001-O [10] como material para la fabricación de la prótesis, con una resistencia a la fluencia de 150 MPa, se determina que el factor de seguridad es de 1,51. Este valor es aceptable porque se consideró una carga de apriete extrema. Puede observarse en la Fig. 9, la curva de convergencia del modelo el cual converge a los 160.000 elementos.



a) Desplazamientos (mm) *b) Esfuerzos (MPa)*

Fig. 8. Resultados del análisis de la prótesis usando el método de los elementos finitos

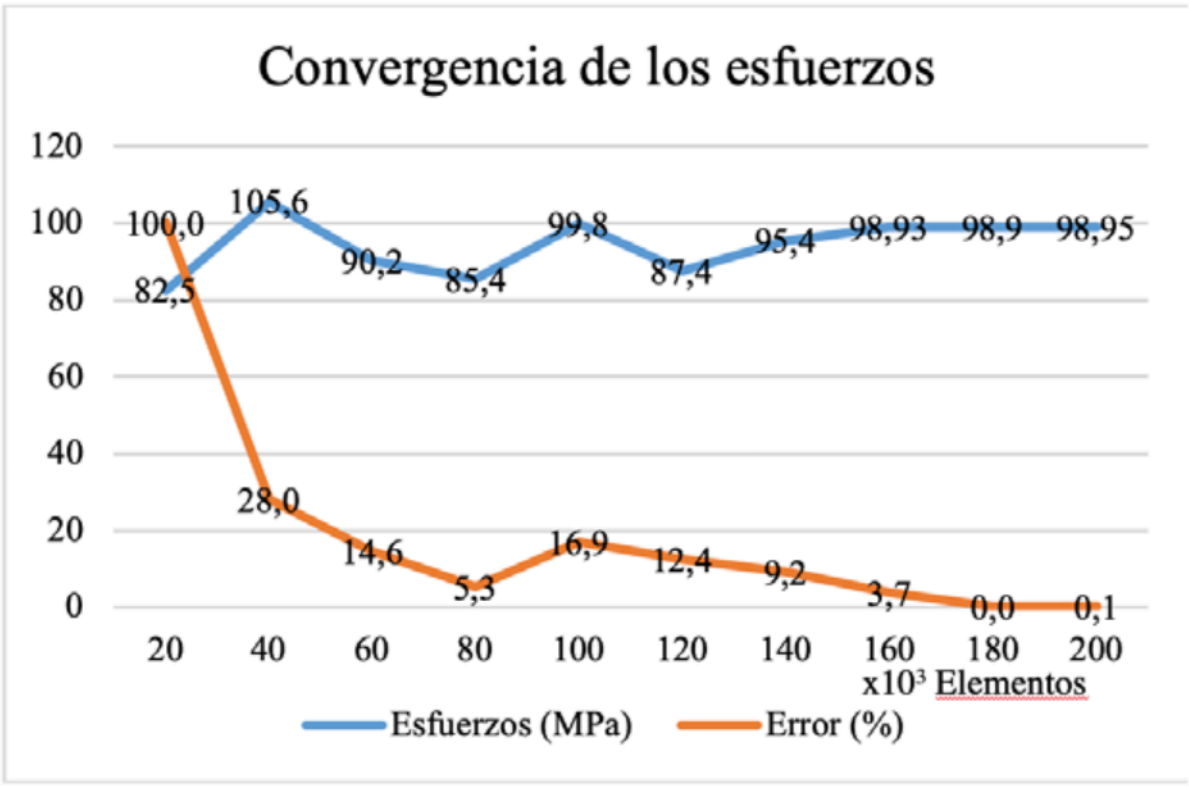


Fig. 9. Curva de convergencia de los esfuerzos y el error relativo del modelo CAD.

Conclusiones y trabajos futuros

El desarrollo de la primera etapa del diseño de una prótesis de mano controlada requiere de gran sincronización y cooperación entre las distintas especialidades, pudiendo sintetizar el desarrollo de este sistema. En este artículo se presenta la fase inicial asociado con el diseño mecánico de los elementos de la prótesis.

Es posible afirmar que el diseño obtenido es funcional, debido a los montajes y simulaciones de cada una de las partes que lo componen, pero aún con estas características, no podría sustituir plenamente las habilidades de la mano, especialmente en condiciones extremas de carga, debido a que el peso y dimensiones del motor obligaron a seleccionar uno con un torque menor al que hubiese sido el ideal. Por otra parte, el movimiento de reposición de la prótesis se debió haber hecho a través de resortes de torsión y gracias a que la flexión fue llevada a cabo con tendones artificiales, estos resortes de torsión añadieron peso extra a la prótesis

Una de las premisas del diseño fue llevar a cabo una prótesis relativamente económica para que tuviese un impacto positivo en la sociedad, esta misma premisa llevó a que la prótesis tuviese un solo grado de libertad, por ello los movimientos no son naturales y presenta un espectro bastante limitado en la variedad de objetos que puede tomar con facilidad, aun así, al realizar el movimiento de flexión y extensión ayuda en gran cantidad de las tareas cotidianas.

El resultado del presente trabajo es el diseño de una herramienta completamente funcional, que podría ayudar a una gran cantidad de personas en las tareas más comunes mediante una implementación que no reviste mayor complejidad y por consecuencia, una inversión moderada.

En forma general, el diseño fue desarrollado exitosamente quedando como posibilidad estudios posteriores como: disminución del peso, humanización del movimiento, desarrollo de sistema para captación de señales mioeléctricas del paciente, desarrollo de una batería de larga duración, acople ergonómico entre la prótesis y antebrazos para diferentes alturas de amputación.

Referencias

Reuters, «Crecen los casos de amputaciones en Venezuela por la escasez de insumos,» Infobae, pp. 1-5, 26 05 2014.

B. Gámez, M. Cabrera, L. Serpa y J. Cabrera, «Mechatronic hand prosthesis for child,» Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering (APCASE), pp. 354-359, 2015.

Y. Ricardo, I. Iglesias, A. Fruto y D. Ojeda, «Las prótesis externas frente a la construcción sociocultural de la imagen corporal,» de Avances en bioingeniería y sistemas inteligentes de rehabilitación en lationamérica 2019, Ibarra, Ecuador, UTN, 2019, pp. 154-157.

F. Cadena, J. Sanipatin, G. Verdezoto, H. Cervantes, D. Ortiz y D. Ojeda, «Acquisition and Conditioning of Electromyographic Signals for Prosthetic Legs,» de Computer Aided System Engineering (APCASE), 2015 Asia-Pacific Conference on, Quito, 2014.

Iglesias I., Tobar Subía L.M., Verdezoto G.A., Alvarez D.A., Chamoro I. (2020) Control of an Ankle Joint with Classic Control Techniques. In: Basantes-Andrade A., Naranjo-Toro M., Zambrano Vizuete M., Botto-Tobar M. (eds) Technology, Sustainability and Educational Innovation (TSIE). TSIE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1110. Springer, Cham.

V. Erazo, F. Valencia, X. Lima, C. Mejía. Prótesis de rodilla tipo transfemoral mediante la metodología basada en la técnica DFMA, in: Diego Ortiz, Cosme Mejía, Iván Iglesias, David Ojeda (eds). Avances en Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación en Latinoamérica 2019 Vol 1. Editorial UTN, Ecuador 2020.

R. Ávila, L. Prado and E. González. Dimensiones antropométricas de población latinoamericana. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño. Segunda edición. ISBN: 978-970-27-1193-3, 2007.

T. Serge, Atlas de anatomía palpatoria. Tomo 1. Cuello, tronco y extremidad superior, Segunda ed., Barcelona: Masson, 2014.

J. Bejarano and D. Barrera. Desarrollo de una prótesis mioeléctrica de miembro superior con amputación transradial por medio del uso de tecnologías 3D. Infometric@ - Serie Ingeniería, Básicas y Agrícolas. Vol 1(2), 2018.

MatWeb, Material Property Data, Revisado el 03/02/2020. Disponible en https://matweb.com/index.aspx. (2020).

Controller comparison and mathematical modelling of ball and beam system

Erick P. Herrera-Granda[1], Israel D. Herrera-Granda[2], Alexis X. Vaca-Espinoza[1], Jonathan G. Loor-Bautista[3], Edgar F. Imbaquingo-Esparza[1]

[1]Escuela de Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial,
Universidad Politécnica de Valencia, Edificio 2E. Camino de Vera, s/n, 46022, España
[2]Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte.,
Av. 17 de Julio 5-21 y Gral. José María Córdova, Ibarra, Ecuador
[3]Carreras de Profesionalización EB y EIB, Universidad Nacional de Educación
Barrio Nueva Coca, sector Mushuk Ayllu, vía Loreto Km 1, Orellana, Ecuador

[1]{epherrera, axvacae, efimbaquingoe}@utn.edu.ec, [2]ishergra@doctor.upv.es, [3]jonathan.loor@unae.edu.ec

ABSTRACT.

The present project shows a comparison between three control techniques applied in the ball and beam system. In the ball and beam system problem, a bar is rotated using a motor and this rotation makes a sphere roll over the bar until it reaches the desired position. The mathematical modeling was done writing the dynamic equations on the state space, and the non-linear state equations were represented as a plant system using Simulink. The applied control techniques were state-feedback controller, linear quadratic regulator (LQR) and neural network based NARMA controller. The three techniques were applied for continuous and discrete signals and were tested with and without state observer. Several simulations were carried out using Matlab and Symulink, and results shown that the system can be stabilized by all the controllers with slight differences, state-feedback was faster and NARMA model was smoother and required a smaller input.

Keywords: State-feedback controller, LQR, NARMA, neural network controller, state space.

Introduction

In the present study, a bar and sphere control system is analyzed to explain the most important aspects of control systems. The bar and sphere system is composed of a bar or beam articulated by a motor, and on it is a sphere that can slide freely. The purpose of this control system is to keep the sphere on the bar in the desired position, by means of control techniques that allow the bar to rotate properly and position the sphere in the desired location.

The configuration in which the present project was carried out is presented in Figure 1, where it is observed that the beam is articulated in its central axis, the advantage of that control system is its ease of construction and its mathematical modelling is simple.

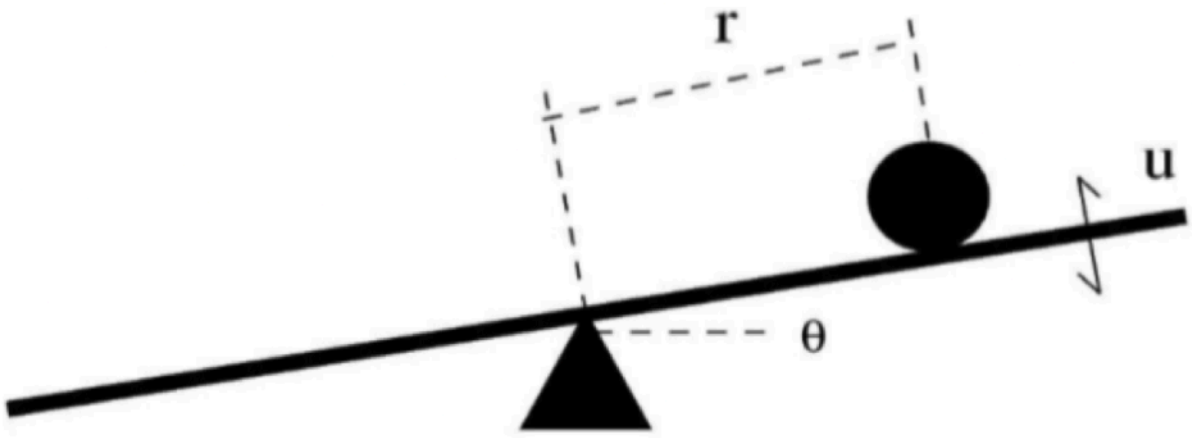


Fig. 1. Ball and beam system and its main variables

This bar and sphere system is considered a subactuated system, because it has one degree of freedom and one single actuator. For the first prototype a study of the linearization and modeling processes in Matlab was carried out, the first objective was to obtain the space state from dynamic equations, then perform a linearization of the state equations and finally model the control system using Matlab.

The controller design techniques employed in this work are state-feedback controller (applying Ackermann's formula), optimal control linear quadratic regulator (LQR) and nonlinear autoregressive mobile average neural network controller (NARMA). These techniques were selected, due to their capacity to control nonlinear systems and the excellent obtained results, achieving stabilization in less than four seconds in all the simulations that were carried out.

The work presented in [6] related to design, construction and modeling of a "Ball and Beam" by Marco Mora Reyes has been taken as a study reference, because it presents a good explanation of mathematical modeling by the Euler-Lagrange method. Also, the work presented in [5] developed by Gregory Cardenas M. was used as a source of information, necessary for the development of the state space and the control system.

Related Works

In the work of [1] the didactic problem of the ball and beam or ball and bar system (B&B) is addressed as a class exaple, which consists in balancing a steel ball on a bar of the same material by means of a single actuator that controls the degrees of freedom of said ball, thereby positioning it on a position determined by the user of the controller. After a modeling process of the physical system, the main functions of the system were obtained, in order to perform a simulation using Simulink. Then the most stable system was determined and a prototype was constructed and implanted in real life, positively closing the learning cycle in the classroom. On the other hand in [2], a prototype for the control of the B&B was developed, by means of a double loop control system and magnetic actuators.

Another prototype for the control of the B&B is detailed in [3], where the control of the position of the ball on the bar is tried by means of actuators that turn the inclination of the bar, and the position and rotation of the ball is monitored in order to feed back the system. Additionally, in [4] the developing of a "Ball and beam balancer" prototype is shown. The prototype used a resistive wire position sensor, a DC servo motor and an Arduino Leonardo microcontroller. Authors used a PID feedback controller algorithm, which depends on the feedback signal provided by a linear potentiometer position sensor, and it can be designed by non-model based methods.

Methodology

This project presents the development and design of the controller to be implemented in the Ball and Beam control system. Initially an analysis of the model was done, in order to get the non-linear functions that represent the plant to be controlled. Then the equations were rewritten as a state space and the resulting system was linearized by Taylor's approximation.

Afterwards, the obtained mathematical model was represented in Matlab using a script for gains and parameters calculation, and Simulink for plant modeling and controller design. Next, simulations on a virtual environment were carried out, using Matlab's V-Realm editor. Finally, a demonstration system's controllability is presented through their respective time response stabilization graphs.

Dynamical modelling

The first part of this project is dedicated to the modeling of the dynamical equations of the ball and beam system. This system consists of a bar which swings a sphere to hold it in the desired position [8]. In this way two different bodies interact, the bar swings and controls to angle and the sphere slides through the bar. In order to control this system, forces in figure 2 were analyzed.

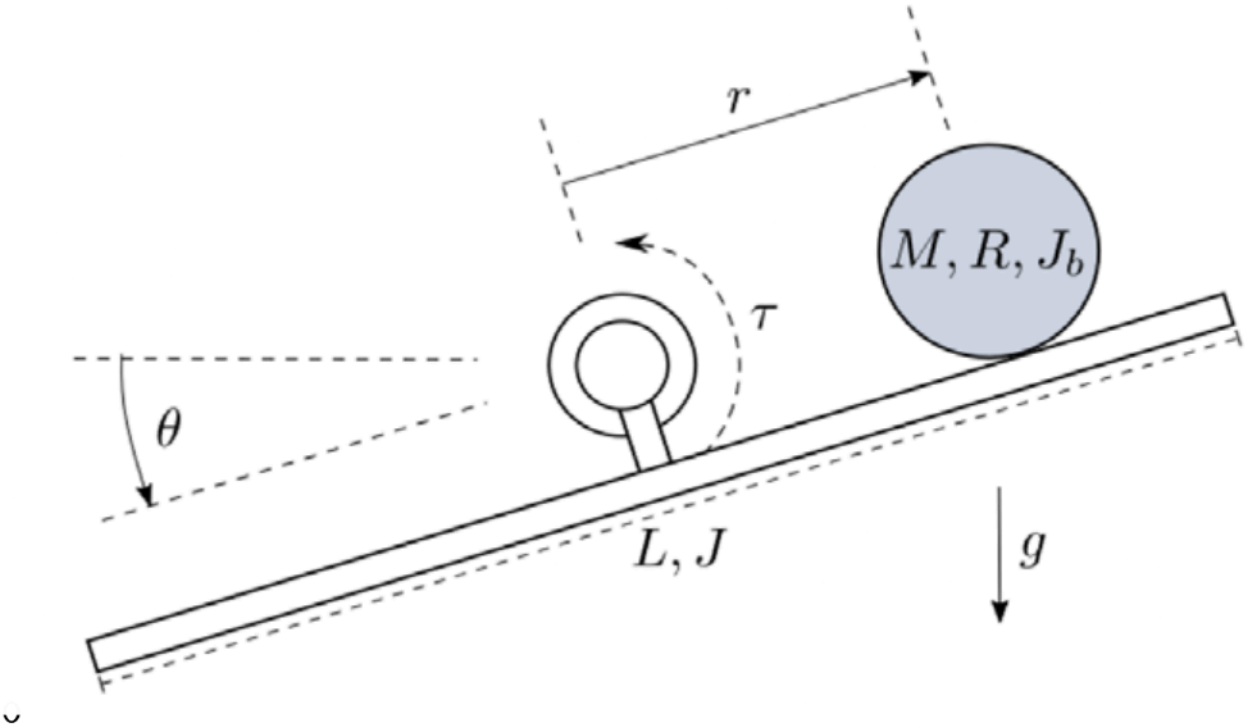


Fig. 2. Ball and beam system, variables and parameters

Where:

ϒ(*t*): Sphere Position

θ: Rail Angle

τ: Applied Torque

g: Gravity acceleration

J: Moment of inertia of the rail

Jb: Moment of inertia of the ball

m: Mass of the Sphere

R: Sphere radius

To start modeling the bar-sphere system, the free-body diagram of Figure 2 is established in which a polar coordinate system is established with respect to the central axis of the bar, considering that the sphere can move freely over the bar. The sphere must remain in contact with the bar without slipping. Defining θ as the rotation angle of the bar respect to the horizontal, and r the position of the sphere, the following L-equations of movement are obtained [4][9]:

$$0 = \left(\frac{J_b}{R^2} + M\right)\ddot{r} + Mg\,sin\,\theta - Mg\,sin\,\theta - Mr\dot{\theta}^2 \quad (1)$$

$$\tau = (Mr^2 + J + J_b)\ddot{\theta} + 2Mr\dot{r}\dot{\theta} + Mgr\,cos\theta \quad (2)$$

Where τ is the momentum or torque applied to the bar; *J* is the inertia momentum of the bar; M and J_b are the mass and the moment of inertia of the sphere respectively ; R is the sphere radius and *g* is the acceleration of gravity. Model (1) can be simplified if the moment τ is replaced, making θ =u.

Space state modeling was used, where the state variables are ϒ, θ and their respective derivatives. Next, the state variables are:

$$x_1 = r \quad (3)$$

$$x_2 = \dot{r} \quad (4)$$

$$x_3 = \theta \quad (5)$$

$$x_4 = \dot{\theta} \quad (6)$$

It is known, that the applied torque τ is the manipulated system variable and r is the position of the sphere and was taken as the output of the system, so it turns out that:

$$u = \tau \quad (7)$$

$$y = r \quad (8)$$

To linearize the system without neglecting values, linearization by Taylor's approximation was used. Where the non-linear system equations in state space results, in [10][11]:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = b(x_1 {x_4}^2 - g\,sin(x_3)) \quad (10)$$

$$\dot{x}_3 = x_1 \quad (11)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-2mx_1x_2x_4 - mgx_1\cos(x_3) + u}{m{x_1}^2 + J + J_b} \quad (12)$$

Where:

$$b = \frac{m}{\frac{J_b}{r^2} + m} \quad (13)$$

Linearization

The system is written in an state space array of the form:

$$f(x,u) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ b(x_1 {x_4}^2 - g\ sin(x_3)) \\ x_4 \\ \dfrac{-2mx_1x_2x_4 - mgx_1cos(x_3) + u}{m{x_1}^2 + J + Jb} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Once the state equations f_i were obtained, the equilibrium point x_q was determined for taking each state derivative as zero x=0, and an input $u_q = 0$. Replacing all the values the state space matrix results in four equilibrium equations:

$$x_{2q} = 0 \quad (15)$$

$$b(x_{1q} {x_{4q}}^2 - g\ sin(x_{3q})) = 0 \quad (16)$$

$$x_{4q} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{-2mx_{1q}x_{2q}x_{4q} - mgx_{1q}cos(x_{3q}) + u_q}{m{x_{1q}}^2 + J + Jb} = 0 \quad (18)$$

Replacing equations (15) and (17), in equations (16) and (18) results in:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_{1q} \\ x_{2q} \\ x_{3q} \\ x_{4q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Then, the state matrices of the bar-sphere system are obtained. For the state space of (19), A matrix is defined as follows:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (19)$$

$$A = \left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_{\substack{x=x_q \\ u=u_q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_{4q}{}^2 & 0 & -gcosx3 & 2x_{1q}x_{4q} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-2mx_{1q}x_{2q}x_{4q} - mgx_{1q}cosx_{3q} + U_q}{mx_1{}^2 + J + J_b} & \frac{2mx_{1q}x_{2q}x_{4q}}{J + J_b} & \frac{mgx_{1q}\sin(x_{3q})}{J + J_b} & -\frac{2mx_{1q}x_{2q}x_{2q}}{J + J_b} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -bg & 0 \\ 0 & & & \\ \frac{mg}{J + J_b} & 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Matrices B and C are as follows:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \hline J + J_b \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (23)$$

The values for the system constants are:

- Mass of the Sphere: 0,1 [*Kg*]
- Radius of the Sphere: 0,1 [*m*]
- Moment of Inertia of the Sphere: 0,004 [*kg* m^2]
- Moment of Inertia of the Bar: 0,02083 [*kg* m^2]
- Acceleration of Gravity: 9,8 [m/s^2]

By entering these values in Matlab, the matrices of the linearized bar-sphere system are obtained:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}1 \\ \dot{x}2 \\ \dot{x}3 \\ \dot{x}4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.96 & 0 \\ -39,47 & 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \\ x4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 40.73 \end{bmatrix} u \quad (24)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]x \quad (25)$$

Controller design and simulation

In Matlab's software constants, k_1, k_2, k_3, k_4 gains, and the respective matrices A, B, Cand D, are replaced to obtain the simulation graphs.

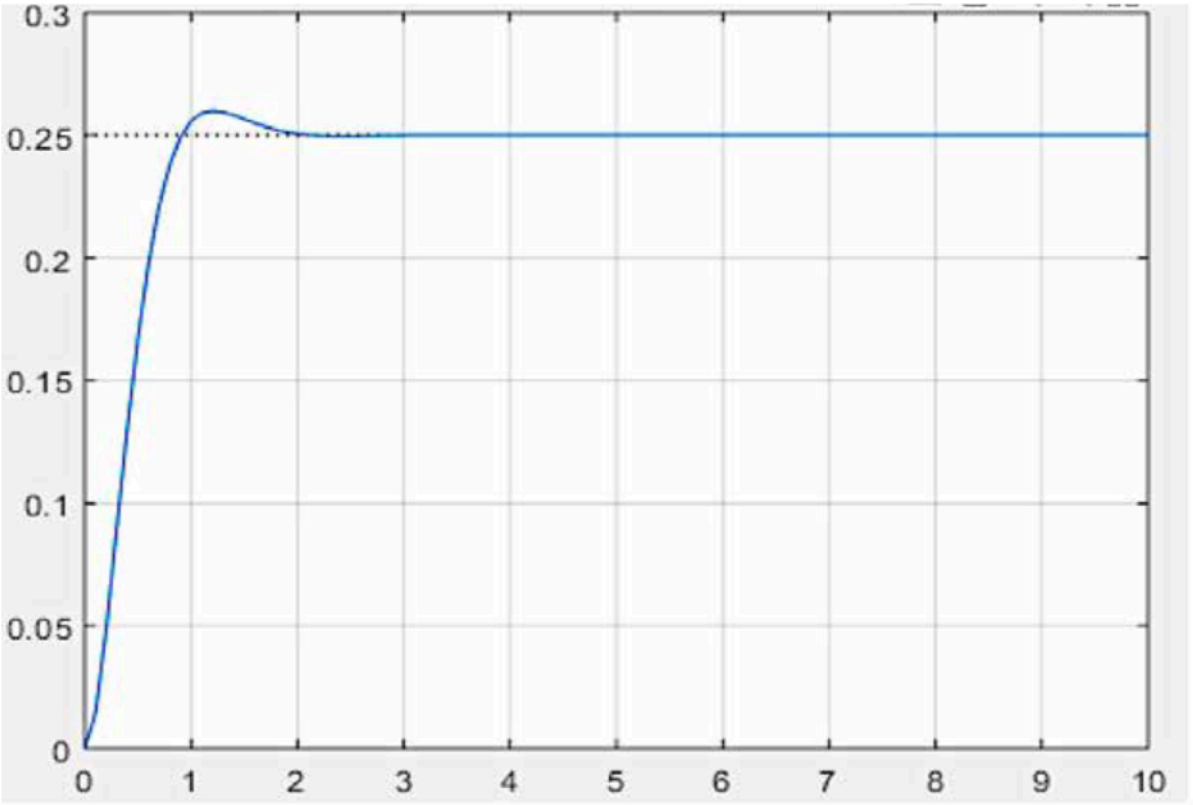


Fig. 3. System response bar-sphere with τ = 0 and initial conditions at zero and unaltered variables.

Figure 5 shows the response of the system with an initial condition θ = 0.1 [rad] and with an input torque of zero τ = 0. For this graph a time window of three seconds was taken and, by modifying the initial condition of the initial angle of the 0.1 rad, it is observed that the system becomes unstable, so the sphere tends to fall from the bar.

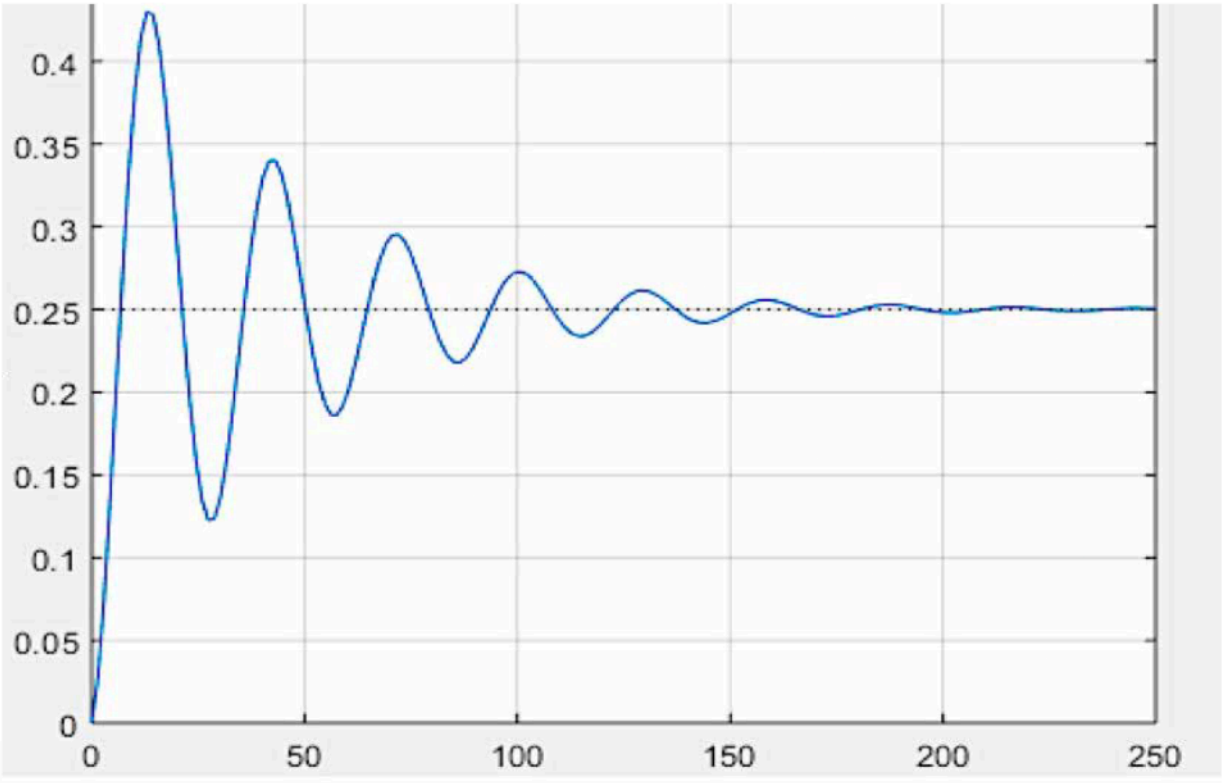


Fig. 4. System response bar-sphere with an initial conditionθ=0.1 [rad] and an input torque equal to zero τ=0

Simulation is carried out in Simulink, for which the parameters were defined as follows:

$$m = 0.111,\ R = 0.015,\ g = -9.8,\ L = 1.0,\ d = 0.03,\ J = 9.99e^{-6},\ H = -\frac{m\,g}{\frac{J}{R^2}+m},\ kp = 0.1,\ kd = 0.1.$$

Afterwards ball and beam system was created using Matlab ss function [7]. The controllability and observability matrixes were obtained, and both of theme were full rank, which suggests that a controller and an observer can be implemented. Applied code is detailed below.

```
sys=ss(A,B,C,D)
pole (sys)
Sc=ctrb(sys)
So=obsv(sys)
rank(So)
rlocus(sys)
```

To see the ball and beam system running in Matlab, a Simulink 3D animation is created, which is a VR SINK block that designs the bar and sphere control system

In Matlab v-realm building, for the rotation and translation of the system two blots of VR Signal Expander were created as shown in Figure 9, 10 and 11 [7].

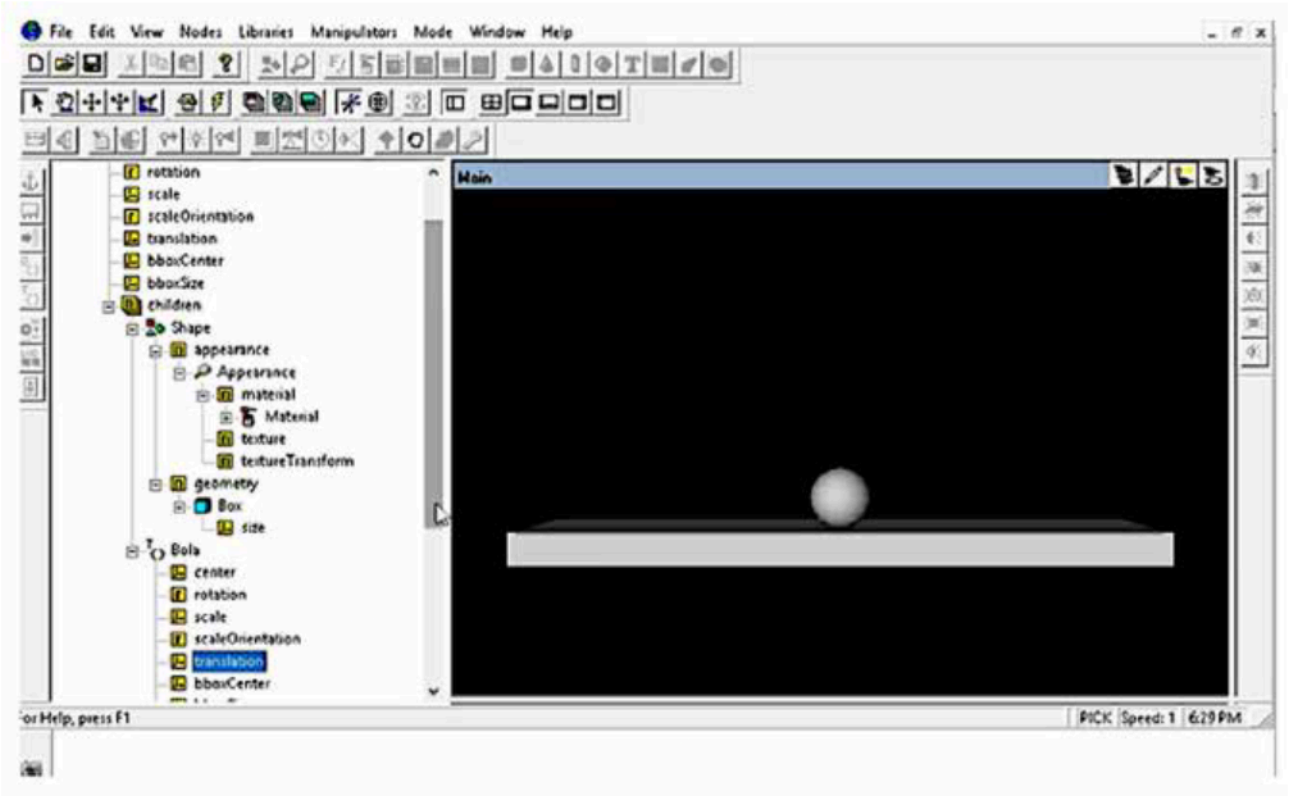


Fig. 5. V-Realm building for the simulation using Matlab

State-feedback Controller. As shown in figures 6 to 8 the system is stabilized in less than 2 seconds, this stabilization is achieved by means of the gains obtained in the previous section.

$$u(t) = -\ Kx(t) + r(t) \qquad (26)$$

The plant is modeled by means equations of state equations:

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t) \quad (27)$$

$$y(t)=Cx(t) \quad (28)$$

Substituting in equation (27) and the given value of u(t).

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+B[-Kx(t)+r(t)] \quad (29)$$

The Simulink model developed for discrete time is presented in figure 6, the required input through the time is shown in figure 7 and the time response of the four states is presented in figure 8.

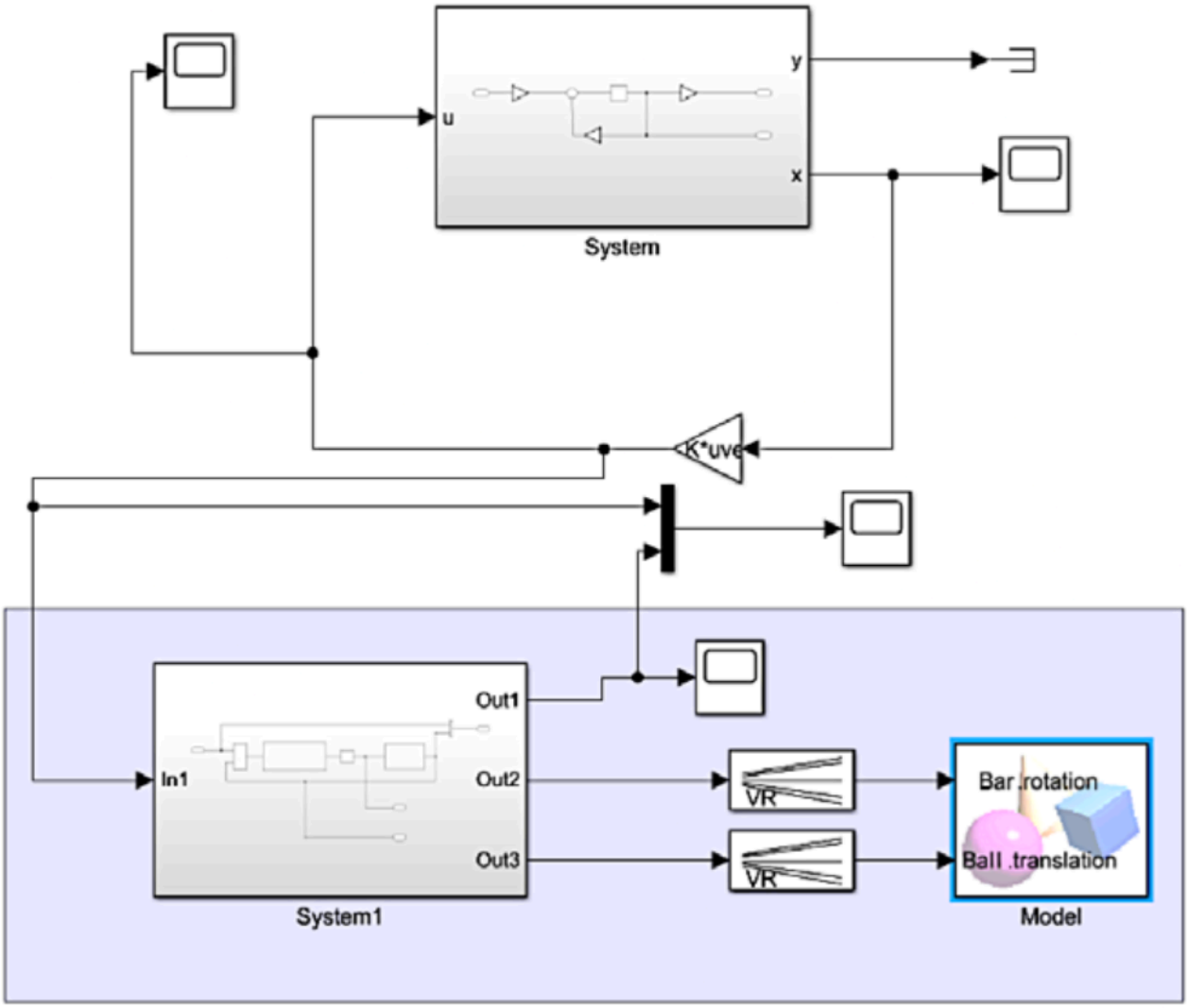


Fig. 6. Simulink model for state-feedback controller

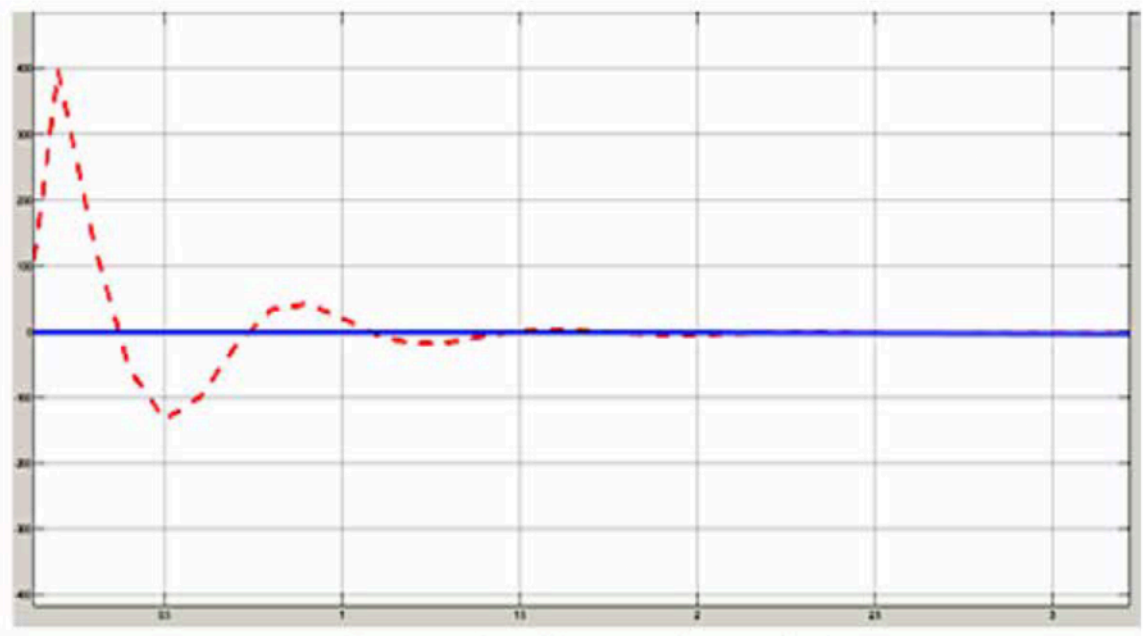


Fig. 7. Required input through time

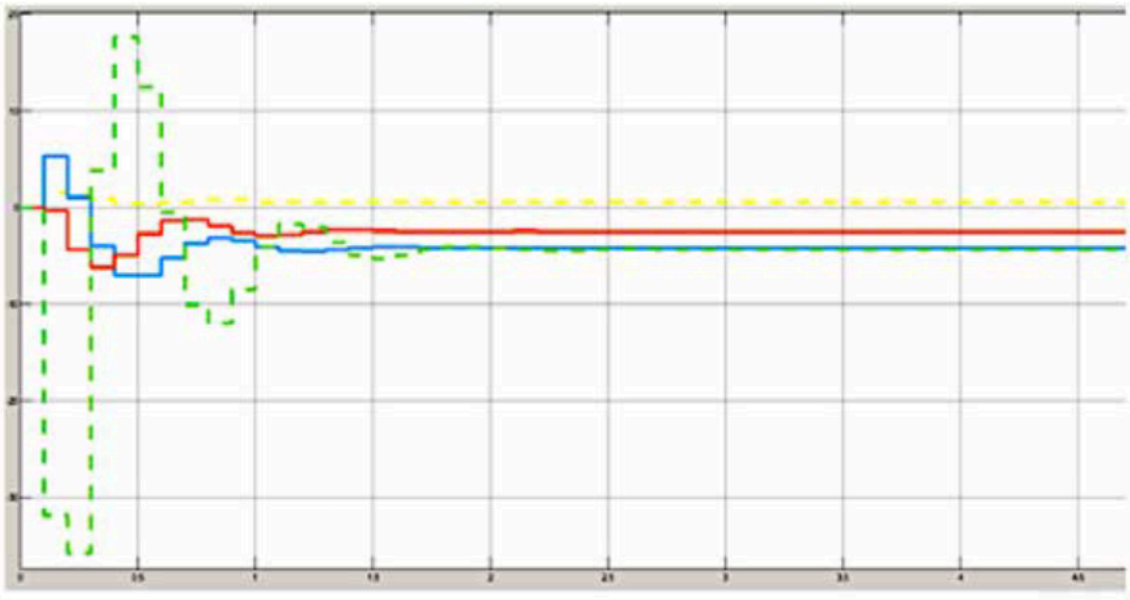


Fig. 8. System time response of the four states

Linear-Quadratic Regulator (LQR). The next applied controller was the Linear-Quadratic Regulator, which uses optimal control theory in order to manage the system at minimum cost. This controller is defined fin state space as follows:

$$\dot{x} = Ax + Bu; x \in \mathbb{R}^n; u \in \mathbb{R}^p \quad (30)$$

$$y = Cx \quad (31)$$

Performance criteria $J = \int_0^\infty [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Rx(t)]dt$; where Q is negative definite and R is positive definite. Then the optimal control that minimizes J is given by the linear state feedback law:

$$u(t) = -Kx(t) \tag{32}$$

Where

$$K=R^{-1} B^T P \tag{33}$$

Where P is the only positive definite solution of the Riccati's algebraic equation (EAR).

$$A^T P+PA-PBR^{-1} B^T P+Q=0 \tag{34}$$

Figure 9 shows the graph of the controlled states for LQR controller. The time response graph shows that the controller stabilized the states in a few seconds.

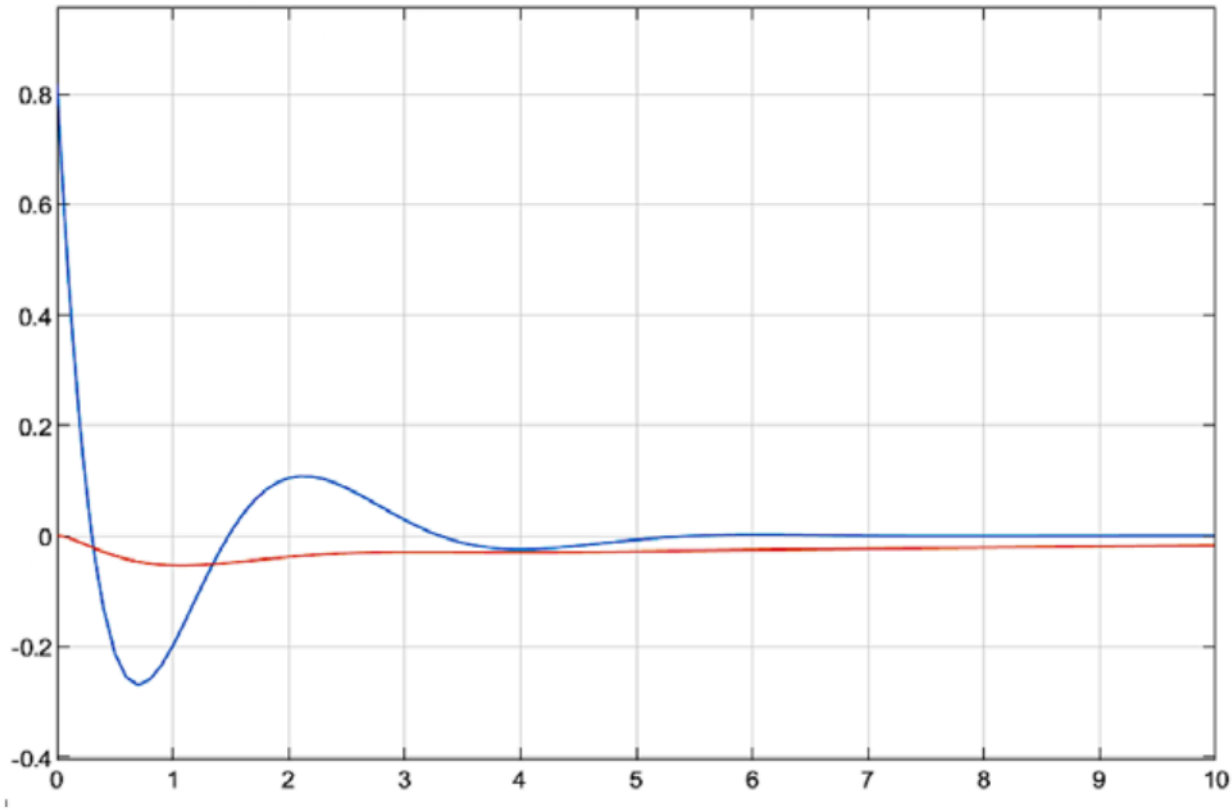


Fig. 9. System time response for the LQR controller

NARMA-L2 Neural Controller. A standard model that is used to represent general nonlinear discrete time systems is the nonlinear autoregressive mobile average (NARMA) model:

$$y(k+d) = N[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] \tag{36}$$

Where u(k) is the system input e and y(k) is the system output. Using NARMA-L2 model the controller law is:

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]} \tag{37}$$

NARMA controller structure, from Matlab's network controller Deep Learning Toolbox block library in Simulink, is shown in figure 10.

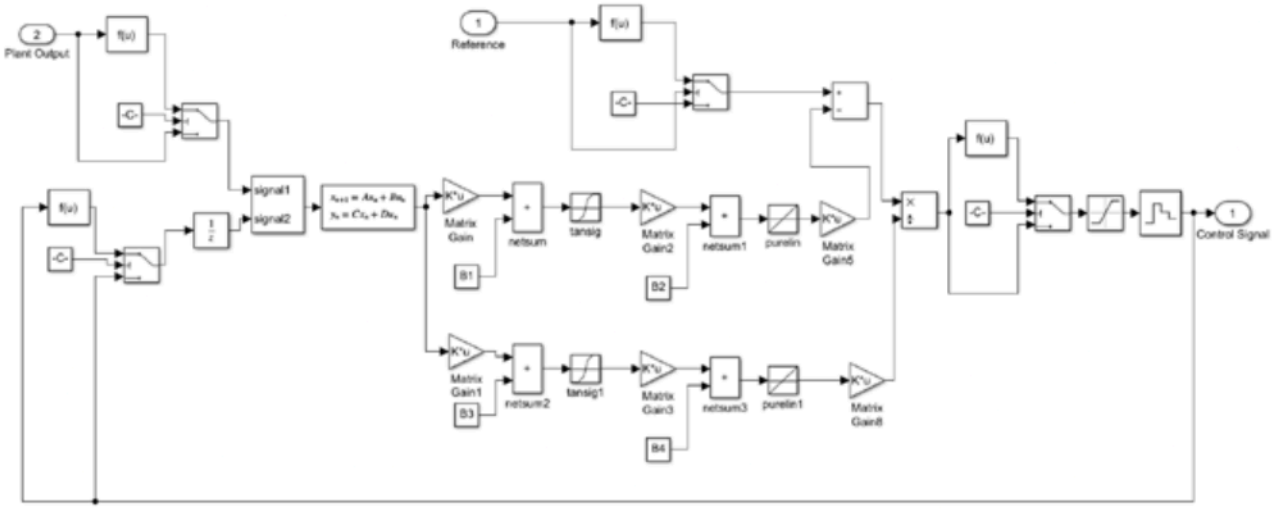


Fig. 10. Structure of Matlab's NARMA controller

For the training stage of the controller 10000 samples of random input signal values were used under Levenberg-Marquardt method, resulting in the neural network shown in figure 11.

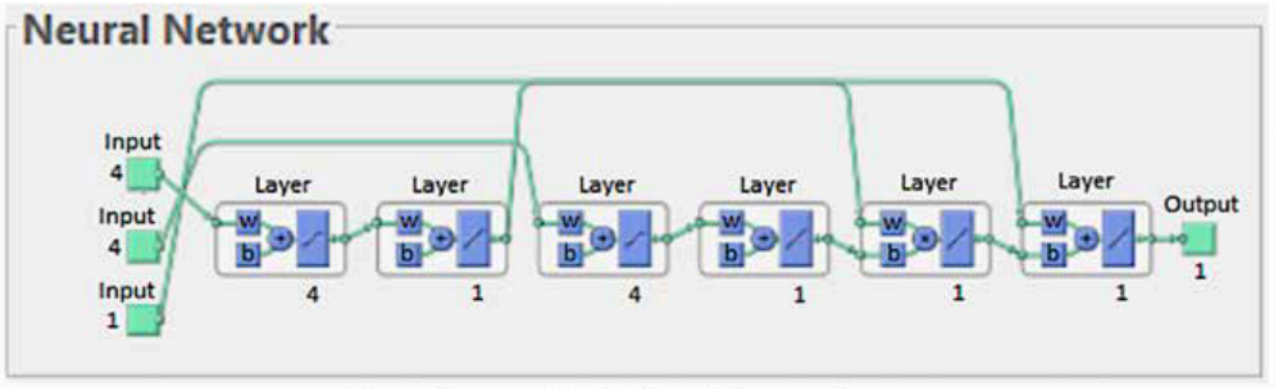


Fig. 11. Neural network obtained from training stage

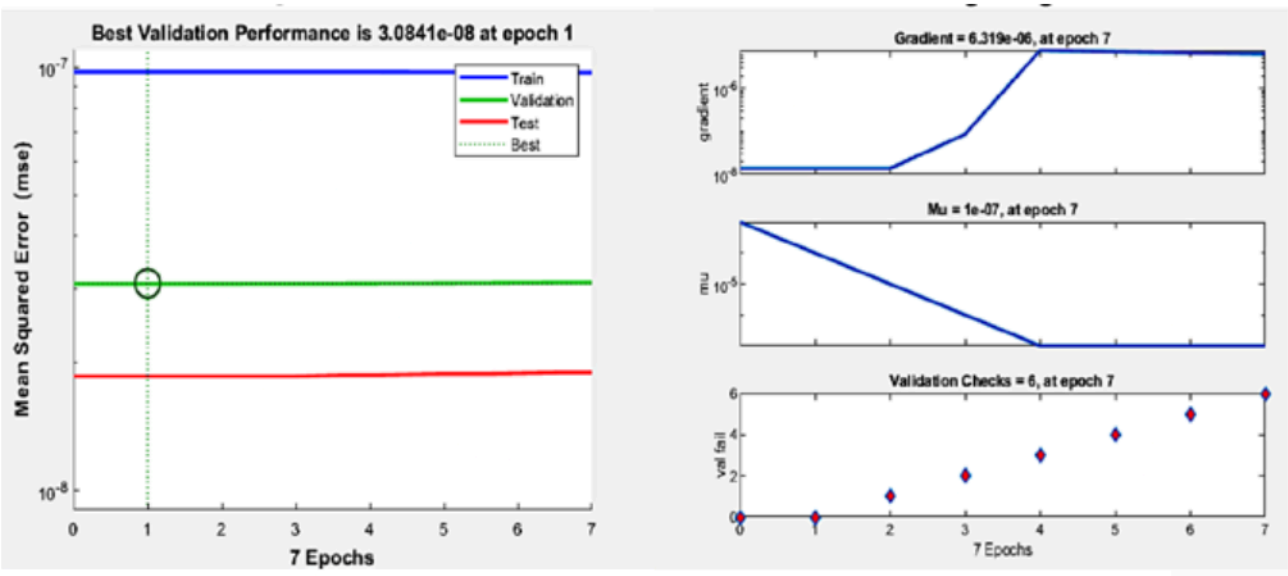


Fig. 12. Performance and training state

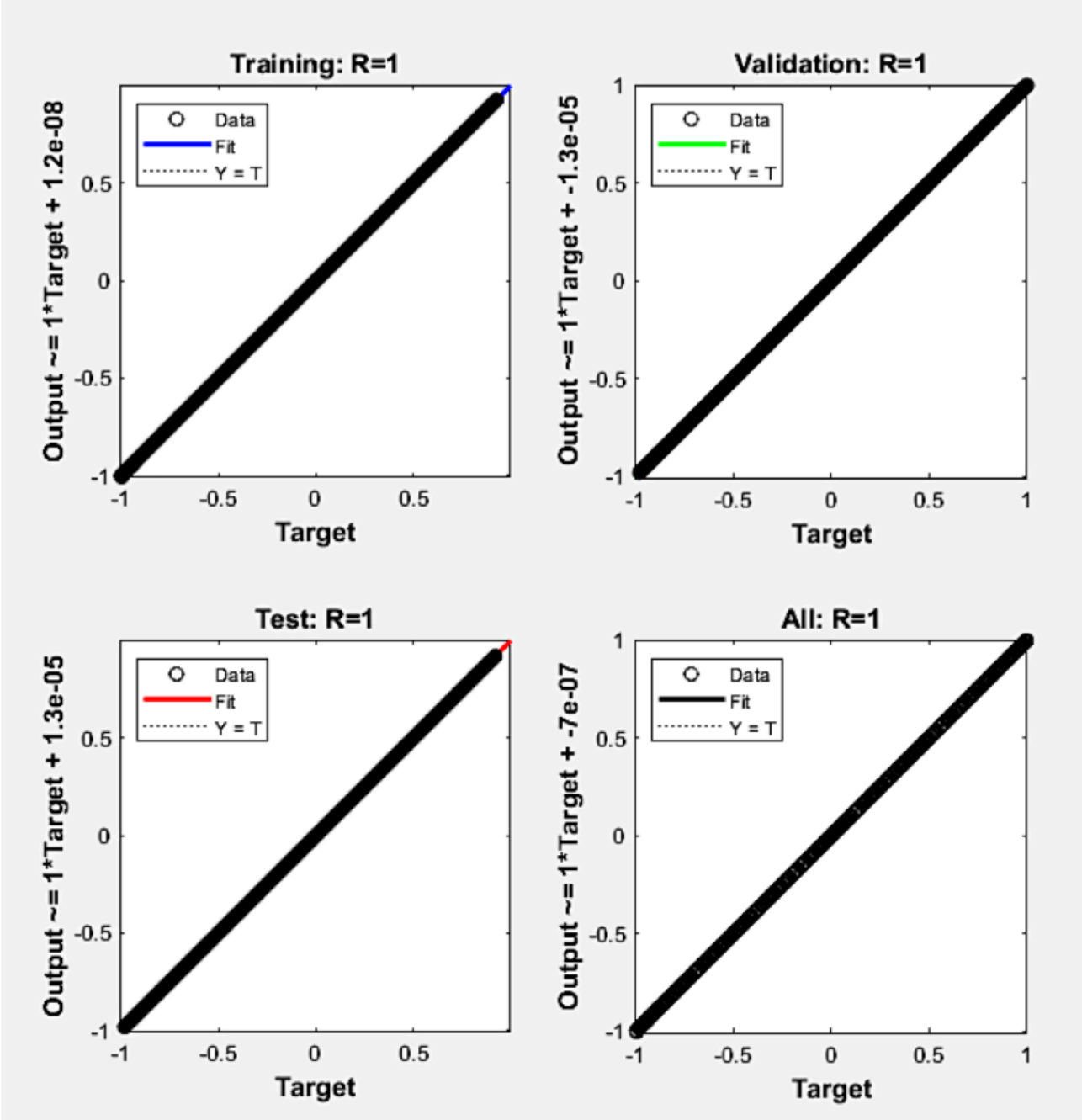


Fig. 13. Regression

Several simulations were carried out, employing constant and variable input references. Figure 14. shows the time response of the ball position, using the NARMA-L2 controller, for a desired reference pulse signal of $\frac{\pi}{36}$ rad amplitude and a period of 15 seconds, where desired ball position was achieved in less than 3 seconds.

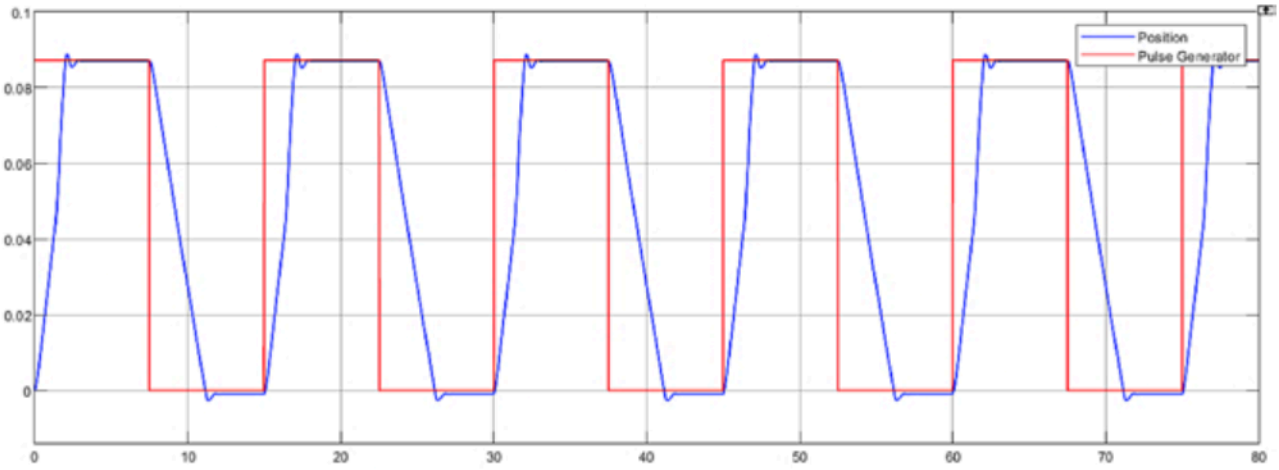


Fig. 14. System time response of NARMA controller for a pulse desired reference signal of π/36 rad amplitude and a period of 15 seconds

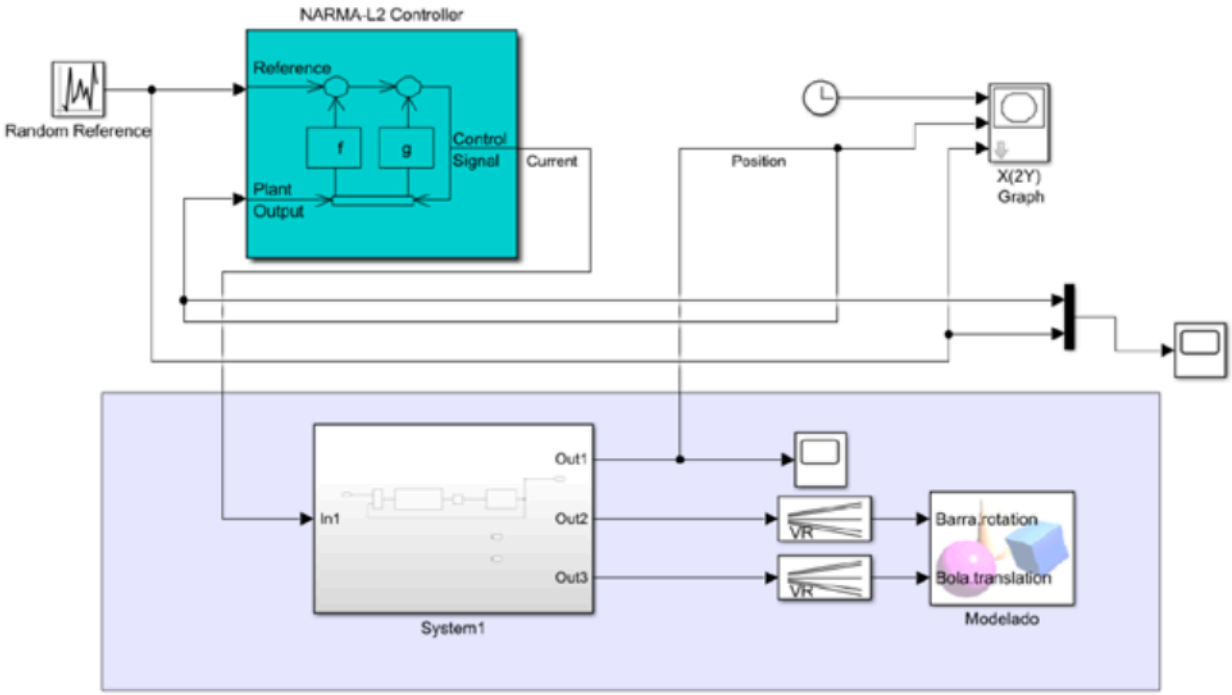


Fig. 15. Symulink model of the NARMA controller implemented in the system

State Observer. The previous state feedback controller was developed assuming that we have full access to the four state values, but considering the results of the observability matrix, an observer was developed and implemented in the Simulink interface, in order to estimate the value of $\dot{r}$, θ and $\dot{\theta}$ given the position of the sphere r. This, also helped to solve synchronization problems employing transformations of the state space to the discrete time using a sampling time of 0,1 seconds by means of zero order hold blocks of Simulynk, which allowed to match the desired output by giving the corrected input in the precise time period. The observer gains were also calculated by Ackerman's criteria and the block diagram and states time response are shown in figures 7 and 8.

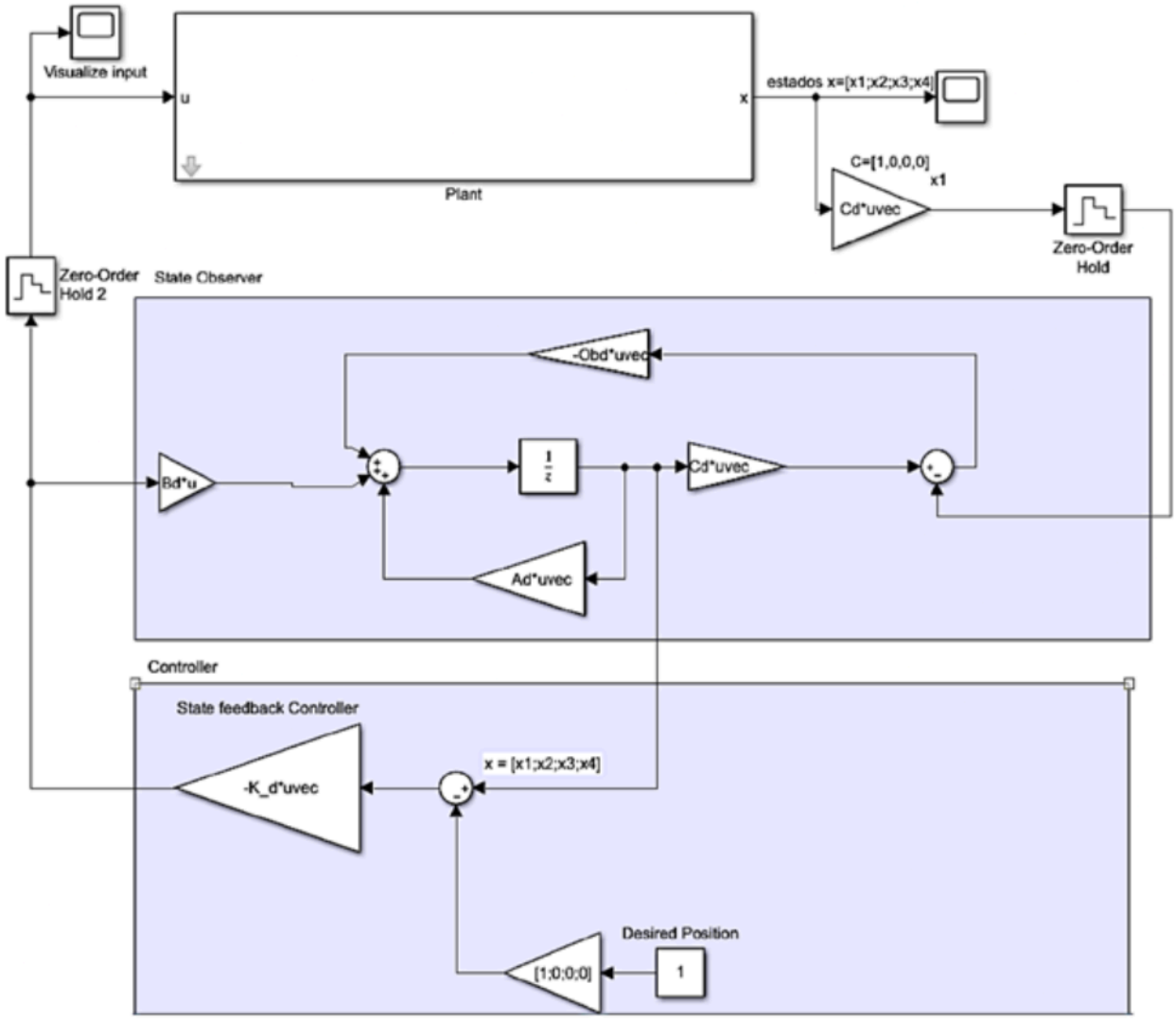


Fig. 15. Simulink model of observer and controller integrated for the system

Finally, as shown in figures 8, 9 and 14, where time response of the states using each controller is presented, overshoot, undershoot, rise time and slew rate, were selected as comparison parameters, in order to perform a comparison of controller's behavior. The results of this parameters for each controller are summarized in table 1.

Tabla 1. Performance characteristics for controller's time response performance

Performance specification	***State Feedback***	***LQR***	***NARMA***
Overshoot	25.37%	8.79%	23.78%
Undershoot	27.56%	2.43%	19.67%
Rise time	153.32 (ms)	587 (ms)	175.54 (ms)
Slew rate	1.78 (/s)	89.45 (/s)	5.46 (/s)

Conclusions and future work

From this work it can be concluded that, the development of a mathematical model by means of a state space, can be used for simulation purposes and brings a lot of possibilities for developing and testing a lot of control techniques and it can bring a lot of information for choosing the best technique for each system.

The three control techniques brought satisfying results, since all of them achieved steady state un a few seconds, but some differences were found. The state-feedback controller was one of the fastest because it was able to stabilize the system in around three seconds, but it required high torque input values and it had some overshoot problems. The linear quadratic regulator had a smoother time response under the same input reference and it required an input torque of smaller amplitude, but it took a larger time period to stabilize the four states. In general, the best results were achieved using the neuronal network-based controller NARMA-L2, because it had a really fast stabilization of around three seconds without significant overshooting problems, and it required a smaller and smoother input.

The implementation of a state observer could represent a challenging task, since two feedback systems have to be linearized and synchronized and by means of a linear multivariate equation given by the means, the input is estimated by the controller and the three states are also estimated by means of the output. This can lead to synchronization problems because the linearization by Taylor's approximation works fine close to the equilibrium point but having two linearized systems running at the same time can easily become unstable. In order to avoid this issue, in this work we converted the system to the discrete time, but other solutions like exact feedback linearization probably could overcome this issue and could be developed as future work.

References

Cuevas López, F., Mora Reyes, M.A., Olvera Mera, C.: Diseño, construcción y control de un "ball and beam." (2008).

Lopez, F., Monroy, P., Antolines, J.D.R.: Control de posición de un sistema bola y viga con actuadores magnéticos. Tecnura. 15, 12–23 (2011).

Blas, A., Martínez, O., Montesinos, J., Solıs, C.: El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de Robótica. In: II Congreso Internacional de Robótica y Computación. pp. 206–213. , Baja California (2015)

Saad, M., Khalfallah, M.: Design and Implementation of an Embedded Ball-beam Controller Using PID Algorithm. Univers. J. Control Autom. 5, 63–70 (2017)

G. C. M., «Modelamiento y Simulación del Sistema Ball and Beam,» Universidad de la Frontera, Temuco-Chile, pp. 1-12, 2010.

Marco Antonio Reyes Cisneros and Peter Wellstead." Sistema de Balancín y Pelota: Principios Básicos". División de Electrónica y Computación, CUCEI, Universidad de Guadalajara, México.

MatLab/Simulink, 7.7.0 R2008b For Unix MathWorks Ins.

Yi Guo,David J. Hill,Zhong-Ping Jiang."Global Nonlinear Control Of The Ball and Beam

System".The University of Sydney. Australia 2017.

Shamsher Ali Naz,Reza Katebi and Luisella Balbis.Implementation of Kalman Filter On Ball And Beam Experiment Using LabView.Industrial Control Unit, Department of Electronics and Electrical Engineering University of Strathclyde, Glasgow, U.K..

A. S. Rivera Pabón y F. López Caamal, «MODELADO, CONTROL Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA ESFERA VIGA POR RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS,» Jóvenes en la ciencia, vol. 3, N° 2, pp. 536-541, 2017.

L. A. B. Sánchez, O. M. Fuentes y J. J. M. García, «El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de Robótica,» Cinvestav, 2015.

Estado del Arte criterios de coordinación de protecciones en líneas de transmisión

Rosalía Revelo[1], Ricardo Rosero[2], Andrés Cuasapaz[2]
[1] Universidad Politécnica Salesiana, Maestría en electricidad Mención Sistemas Eléctrico en Potencia. Quito, (Ecuador)
[2]SUCRE Instituto Tecnológico Superior, Carrera de Electricidad Av. 10 de Agosto N26-27 y Luis Mosquera Narváez, Quito, Ecuador.

[1]rrevelos@est.ups.edu.ec, [2]rrosero@tecnologicosucre.edu.ec, dcuasapaz@tecnologicosucre.edu.ec

RESUMEN.

En un sistema eléctrico de potencia (SEP), se ejecutan diversas interacciones entre los actores y componentes internos y externos, que involucran acciones y toma de decisiones económicas y técnicas. La confiabilidad del sistema viene ligado a su diseño, construcción, operación, mantenimiento y respuesta oportuna ante fallas eléctricas. En esta recopilación de información técnica, se ha realizado una investigación abordando los temas de las protecciones eléctricas, enfocadas principalmente en los competentes de Líneas de Transmisión, logrando tener un criterio de coordinación de protecciones, considerando la interacción de elementos activos y su comportamiento ante fallas, logrando encontrar fenómenos asociados en la dinámica del sistema como problemas topológicos, fenómenos transitorios, condiciones extremas, fenómenos naturales y analizar en base a lo ocurrido en los antecedentes de posibles aperturas incorrectas de los relés, aportando con criterios de calibración, para lograr una óptima operación y actuación correcta de protecciones en estado estable y transitorio.

Palabras Clave: Protecciones eléctricas, relé, sobre corriente; relé de distancia, condiciones extremas, línea de transmisión, coordinación, estado del arte.

Introduction

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) conformados por generadores, líneas de transmisión y cargas están interconectados e interactúan todo el tiempo debido al comportamiento natural del sistema eléctrico. Además, la relación existente entre generación y demanda, existen elementos dinámicos como los generadores y elementos estáticos como líneas de transmisión y cargas que se relacionan entre sí por las leyes físicas que rigen la transformación de energía eléctrica y mecánica [1].

El principal problema que tienen los sistemas de transmisión específicamente el alto voltaje superior a 500 kV es mantener la estabilidad frente a fallas [2]. En ocasiones y dependiendo del tipo de falla, el SEP es incapaz de volver a un punto de estabilidad a pesar de aplicar sus mecanismos de reacción y defensa como la regulación en distintos niveles del valor de frecuencia.

Para prevenir todos estos fenómenos y tener control sobre ellos, se han implantado esquemas de protección sofisticados. Entre estos esquemas de protección se tiene: alivio de carga, de alivio de generación, de protección sistémica, de protección local, sistemas de medición en tiempo real, estimador de estado, sistemas de protección ante oscilaciones. Además, en los generadores se han implementado sistemas de control de alto nivel de respuesta como reguladores de velocidad, reguladores de voltaje. Y a pesar de todos los esfuerzos, se tienen fallas catastróficas, que evaden todo sistema de control. Más aún si se incluyen a toda la dinámica del SEP, la ocurrencia de condiciones extremas como fenómenos naturales y/o rechazos de carga que llevan al SEP a un sistema de emergencia y colapso.

Para abordar toda la problemática descrita, en esta investigación se realiza un aporte significativo en el estudio del estado del arte de las protecciones eléctricas. El presente documento se divide en cuatro secciones: la problemática en el área de protecciones, los fundamentos básicos y principios de las protecciones, y las metodologías existentes para el desarrollo matemático y algoritmos utilizados en diferentes aplicaciones. Finalmente se presentan las conclusiones del presente artículo.

Problemática

Diseñar un sistema de protección que sea preciso, confiable, seguro, rápido, selectivo y sensitivo ante mínimas variaciones es un arte. A través de la historia los sistemas de protección se han desarrollado junto a la academia, quienes han aportado con metodologías avanzadas y precisas para la calibración, detección de fallas y diseño de protecciones que hoy tienen gran avance tecnológico [3].

Con las tecnologías actuales en la computación y la velocidad de procesamiento de los equipos, han aportado en la creación de nuevas herramientas computacionales en software y hardware, siendo capaces de reaccionar rápidamente en el orden de milisegundos y microsegundos.

La matemática en la actualidad es capaz de resolver problemas de gran complejidad, con muchas variables y llegar a una respuesta muy cercana al optimo, con métodos de optimización, algoritmos, heurísticas y solución de ecuaciones diferenciales no lineales.

Un tema complejo y con aplicaciones puntuales es el tema de la actuación de una protección ante una contingencia N-x, casos que se presentan cuando ocurre una salida en cascada de equipos o a su vez cuando se tiene un desastre natural o de vandalismo. Entre los desastres naturales podemos mencionar huracanes terremotos, maremotos, tsunami, erupción volcánica y entre los casos de vandalismo se tienen ataques, guerras, terrorismo [4], prevenir un desastre natural es un reto para la ingeniería actual, sin embargo se debe destacar que el desarrollo tecnológico considera equipamiento antisísmico, y esta característica es parte del diseño de una nueva infraestructura donde se debe garantizar que la subestación que contiene los equipos más costosos de la instalación, como el transformador de potencia, y el equipo primario, interruptores, seccionadores, pararrayos, se afecten en mínima cantidad [5].

Los desastres naturales causan blackouts que dejan al sistema eléctrico en emergencia, y se necesita entender los impactos de aquellos fenómenos para incrementar la resiliencia del SEP. La tecnología que se ha implementado para prevenir y predecir estos fenómenos consiste en equipos de medición inteligente y las Smart Grids [6].

Los efectos en el SEP en un desastre natural van más allá de los daños físicos en infraestructuras, produciendo averías en el sistema eléctrico, en los sistemas de transporte, bombeo, agua potable e hidrosanitarios [4], la recuperación del sistema eléctrico posterior a un desastre natural es un problema muy complejo [7]. El concepto de sistema resiliente es una idea que surge luego de años de investigación de blackouts relacionados con desastres naturales como en 2005 Huracán Katrina, 2011 Terremoto de Japón, 2012 Huracán Sandy [8], entre otros.

A. Errores en actuación de protecciones

En toda la red interconectada, existen fenómenos transitorios causados por perturbaciones internas o externas [9]. Los elementos involucrados y que deben ser consideradas por su aporte en las fallas son los generadores asincrónicos [10], [11]. Las protecciones juegan un papel importante debido a que deben despejar fallas en milésimas de segundo, para proteger al equipo más costoso de la instalación.

Los principales problemas que se observan de la investigación realizada son:

- El Colapso de voltaje y reversión de corriente, efecto indirecto debido a la contaminación armónica debido al comportamiento de los sistemas de control FACTS [12].

- Incorrecto tiempo de apertura, coordinación inadecuada, entre la zona principal y de respaldo, debido a que no se tiene el valor exacto del tiempo de coordinación respecto al tiempo de apertura, Traslape de zonas de protección de distancia, incorrecto ajuste y delimitación de la zona [13].

- Cambio de topología, salida de equipos en cascada provoca una incorrecta actuación ante la contingencia N-x, el relé no puede saber el estado de la topología posterior a un colapso en cascada.

- Cambio de la capacidad electrostática, influencia del efecto capacitivo en líneas largas, influencia en el cálculo de la impedancia efecto de la falla a tierra en sistemas aterrizados [14].

- Error de detección de fallas frente a contaminación UVH producidas por ondas transitorias viajeras, donde el efecto distorsiona el comportamiento del voltaje y la corriente, evitando que la protección sea selectiva en la apertura de una falla. Sin embargo, esta propiedad puede ser aprovecha con protecciones especiales que utilizan esta información de alta frecuencia para la detección de la falla [15].

- Falla en la detección, por la influencia de la impedancia a tierra y por la desviación del factor de potencia de la carga [10].

- Error en la delimitación de la zona de protección distancia, con calibración cuadrilateral. En la ocurrencia de una falla la impedancia de la línea de transmisión es afectada por los componentes transitorios de la corriente de secuencia cero en los primeros ciclos, por ello se tiene el problema en las protecciones convencionales que determinan una zona de protección cuadrilateral sin considerar los efectos transitorios [13].

- Actuación incorrecta de relés debido a la variación de impedancia durante una oscilación de potencia, incorrecto bloqueo del disparo por oscilación de potencia. OST: Disparo por oscilación de potencia (out-of-step tripping) [16].

- Error de la actuación de la protección de distancia debido a la compensación serie y paralelo de potencia en un colapso de voltaje (VARS insuficiente) [17].

- En la protección sobrecorriente ocurre un problema en la coordinación de relés, debido a que el relé de respaldo debe funcionar solamente si el relé primario ha fallado [18].

Protecciones de líneas de transmisión

En el año 1976 se desarrolló el primer relé basado en ondas viajeras, protección utilizada en líneas de transmisión largas, para fallas a tierra con resistencia [19]. En los últimos años se han incluido en las protecciones elementos de electrónica de potencia para sistemas de corriente alterna para compensación de voltaje como también para el control de flujo de potencia [17], [19].

Los análisis de falla en las protecciones digitales, comprenden tres etapas: en la primera se detecta la falla, en la segunda se clasifica el tipo de falla y en la tercera etapa se localiza y estima el valor de corriente y actuación de la falla. Para que estas etapas entreguen resultados reales, se necesita una unidad de detección de fallas que sea capaz de discriminar las fallas de eventos que no son fallas. Los equipos FACTS [17], influyen directamente en la detección y discriminación de la falla, por ello su influencia debe analizarse cuando se trata del tema de coordinación en Extra Altos Voltaje y Ultra altos voltajes

Las protecciones utilizadas para líneas de transmisión en sobrecorriente y distancia, con sus combinaciones permiten tener una protección más segura, debido a que se mantiene confiabilidad ante la contingencia N-1, sus combinaciones se usan de la siguiente manera, en la primera zona, la protección de distancia es la principal y la protección sobrecorriente su respaldo, otra combinación posible es viceversa en la segunda zona [20]. Existen protecciones adicionales como la protección de distancia 21, sobrecorriente instantánea 50, sobrecorriente temporizada 51N de resistencia a tierra y la protección diferencial de línea 87L.

B. Protección sobre corriente en L/T

El bajo costo y la facilidad para la calibración e instalación son las características que hacen a la protección sobrecorriente una de las más utilizadas para la protección de líneas de transmisión, el relé funciona después un de un tiempo siempre y cuando la protección asignada como principal, no despeje la falla en un tiempo determinado. Esta protección es capaz de observar el sentido de la corriente por lo que solo podrá observar fallas que están hacia su zona de protección además podrá observar si la corriente cambia repentinamente su sentido de dirección.

La protección de corriente, puede ser calibrada por la filosofía convencional, así como con técnicas de optimización de parámetros. El método convencional determina el Break Point Set Point, con la teoría gráfica, mientras que el mínimum Break Point Set, en la cual se ubica en la curva tiempo corriente en escala logarítmica el tiempo de actuación y la corriente máxima de cortocircuito en la que debe actuar, los software especializados como Power Factory, Etap se utilizan para este fin, para sistemas interconectados y con la tecnología y algoritmos matemáticos desarrollados, se calculan los tiempos de actuación con métodos de optimización [21].

El análisis de fallas en la técnica convencional divide a la malla en circuitos radiales y se calibra el relé que se encuentra ubicado en el extremo de la red radial, posteriormente se calibran todos los relés que se encuentran en la malla. El método convencional se aplica en redes pequeñas, mientras que en redes de gran complejidad el método de calibración convencional es inviable. En la figura 2 se observa la curva tiempo corriente para la protección sobrecorriente.

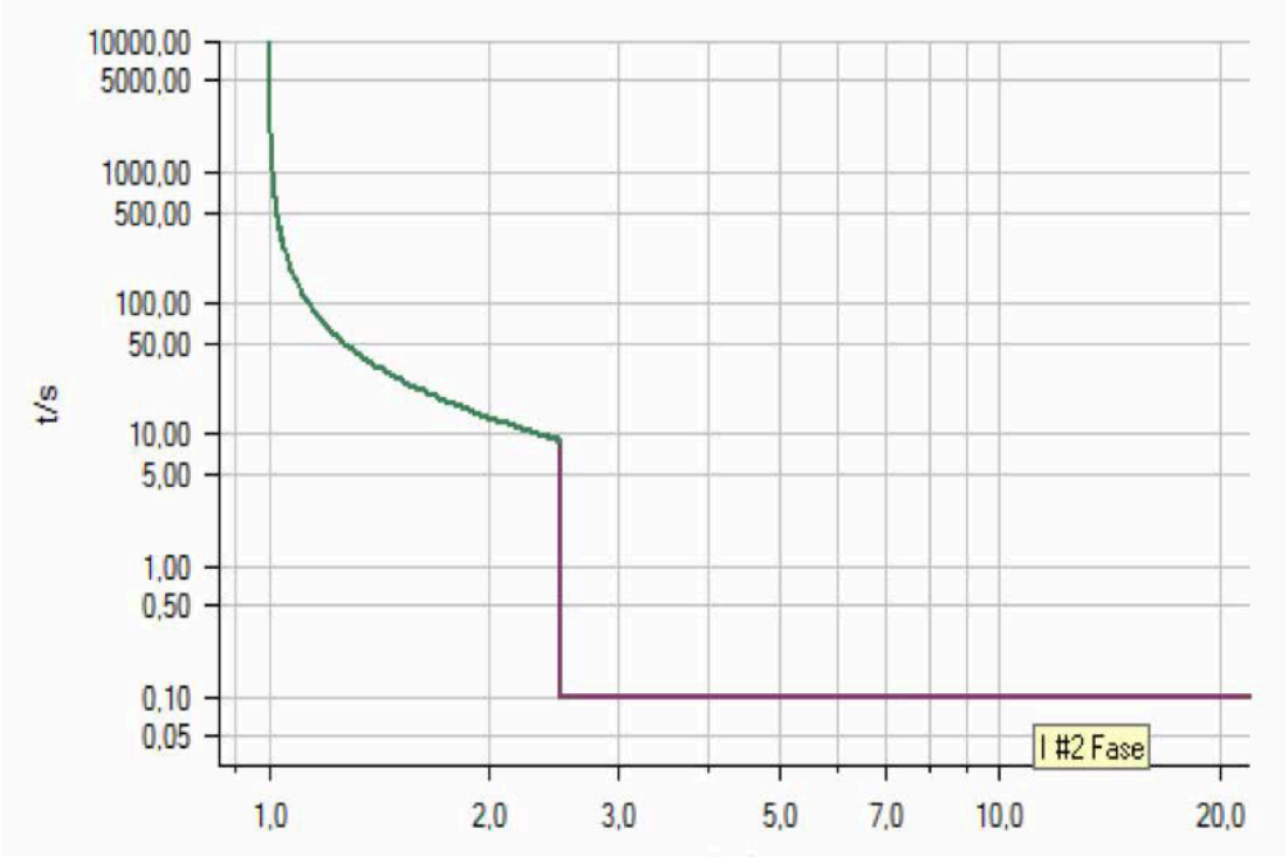


Fig. 2. Curva tiempo –corriente relé de protección sobrecorriente [22]

C. Protección distancia en L/T

El relé de distancia calcula la impedancia de la línea de transmisión, para ello necesita mediciones de corriente y voltaje, que son adquiridos a través de los equipos de medición como TC transformadores de corriente y TP transformadores de voltaje, utilizados para el monitoreo de la línea, el relé debe operar siempre, antes de la ocurrencia de un cortocircuito, la impedancia medida debe ser menor que la impedancia de ajuste [22].

Las zonas de protección de un relé de distancia son 4: Zona 1 protege hasta el 80% de la impedancia de línea de la sección 1, Zona 2 protege el 100% de la impedancia de línea de la sección 1, más el 50% de la impedancia de la línea de la línea contigua más corta en la siguiente sección. Zona 3 tiene dos ajustes, el primero considera el 100% de la impedancia de línea de la sección 1, más el 100% de la impedancia de línea de la sección 2 + 25% de la línea impedancia de la sección 3, el segundo ajuste considera el 100% de la impedancia de línea de sección I + 120% de la impedancia de línea de la más larga Línea contigua en la sección 2. Finalmente, la Zona 4 o llamada también Zona 3 (reverso) protege el 15% de la Zona 1. En la figura 3 se observan las zonas de protección de forma gráfica.

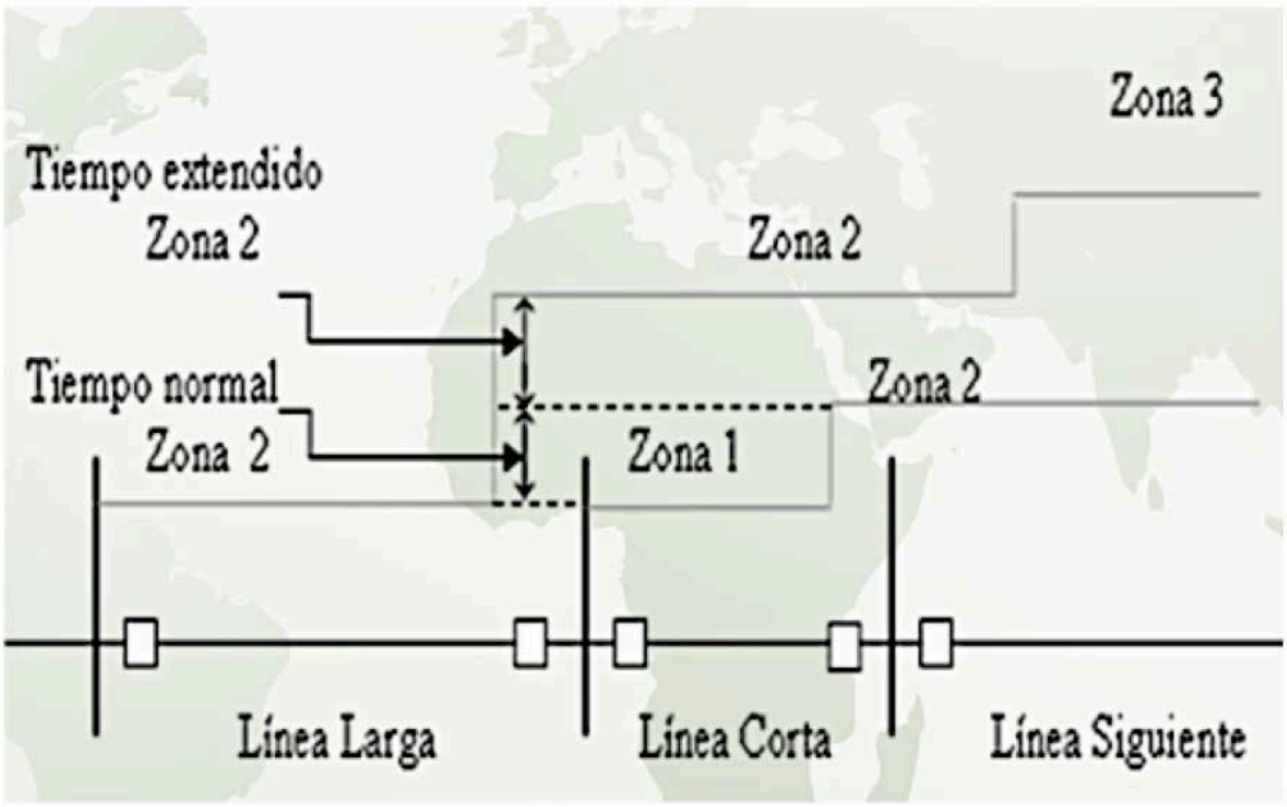


Fig. 3. Zonas de protección relé 21 [22]

El relé de distancia se utiliza en las líneas de transmisión L/T como protección principal y de respaldo dependiendo de la zona de actuación [23]. La tecnología actual ha desarrollado un relé adaptativo capaz de adaptarse y variar las condiciones de protección en el momento de la falla, los relés actuales utilizan microprocesadores de alta velocidad [6].

Métodos de óptima coordinación de protección sobre corriente y distancia

Existen métodos de optimización que se aplican en los ámbitos de coordinación de protecciones para líneas de transmisión, en este trabajo se han recopilado investigaciones que datan 30 años, desarrollados para aplicaciones específicas, el enfoque va dirigido a las protecciones sobrecorriente y distancia, con la relación de los criterios de coordinación, una descripción general de la metodología se desarrolla a continuación en cada método se ha enfocado un problema y un algoritmo de solución, entre los cuales se pueden destacar los siguientes métodos de optimización del tiempo de operación de las protecciones basados en algoritmos genéticos GA, que minimizan el error en cuanto al tiempo óptimo de actuación, otros métodos trabajan sobre la metodología de algoritmos genéticos y aumentan restricciones y desarrollan algoritmos Teaching Learning Based Optimization TBLO. También las investigaciones se enfocan en el método de inteligencia artificial (AI) y Natural inspire Algoritmo (NIA) estas metodologías se establecen criterios de optimización para los relés de sobrecorriente resolviendo el problema de coordinación.

En [24], se menciona el método de lógica difusa junto al método de algoritmos genéticos para optimizar el tiempo y obtener el mínimo valor de descoordinación en el relé de sobrecorriente. En [15], se menciona el método Teaching Learning Based Optimization (TLBO). método utilizado para determinar el time dial Seting (TDS) del relé de sobre corriente. En [22], utiliza el método de programación lineal para encontrar la calibración

del relé de sobre corriente y distancia utilizando la curva tiempo corriente inversa para el relé dirección de sobre corriente. En [25], se aplica un método de coordinación basado en la adaptación de la función cuadrática que involucra la adaptación de la zona cuadrilateral del relé de distancia En [10], se consideran las características no estándares del relé de sobre corriente y se las incluye en un nuevo modelo matemático. En [26], se presenta un relé numérico con algoritmos matemáticos y microprocesador de alta velocidad. En [27], se explica un modelo basado en la distribución de parámetros de las líneas largas y el diseño de un algoritmo computacional capaz de variar la zona de protección en base a la distribución de voltaje. Otro método basado en AI Artificial Inteligencies and NAI, natural Inspire Algoritmos se utiliza para la coordinación de la protección sobrecorriente en [28].

En [29], se presenta una coordinación óptima utilizando un algoritmo no lineal JAYA que encuentra el óptimo Tiempo apertura de Trip del relé de sobre corriente un algoritmo descubierto por Rapvipudi Venkata en el año 2015 y que significa Victoria.

A. Métodos de Optimización de Algoritmos genéticos

Existe métodos de óptima coordinación en [30], [31], [32], [33], de los relés de distancia, y sobrecorriente basados en el método de algoritmos genéticos que se aplican para optimizar el tiempo de apertura del relé y obtener el mínimo valor de descoordinación en el relé de sobrecorriente.

En esta metodología, como en todos los métodos de optimización por algoritmos genéticos GA se necesita una población al azar para escoger el TSMs Mínimum Time Set para cada relé, a esta población se la denomina Genomas de los cromosomas, para la optimización se forman grupos denominando a los relés R1, R2. R3…Rn, y los tiempos de seteo, TSM1, TSM2, TSM3…SMS, posteriormente se realizar la combinación entre cada uno de ellos, formando pares, la combinación es aleatoria, convirtiéndose en un método iterativo, en cada iteración son eliminados los genomas que no sobrevivieron a la mutación, este proceso es repetitivo, finito y termina cuando el número de iteraciones es igual al tamaño de la población. El objetivo este método es definir una función objetivo OF, Los cromosomas son evaluados respecto a la función Objetivo OF y los mejores cromosomas se utilizarán para formar una generación nueva de cromosomas mejorados. Es necesario que la mutación se de en cada iteración para que no se cometa el error de atrapar los mínimos locales.[30]

El GA es un algoritmo popular que realiza una búsqueda heurística basada en ideas evolutivas de selección natural de genes. Se crea una población de espacio de búsqueda que contiene conjuntos de soluciones factibles (cromosomas). Las variables de decisión (dial, k) se codifican como genes en las cadenas del cromosoma. Luego, los genes se evalúan, penalizan, clasifican y seleccionan de acuerdo con su valor de aptitud de la función objetivo. Posteriormente, se aplican los principios de la evolución genética (cruce, mutación) y se forma la nueva población. Todo el proceso se repite hasta que se cumple el criterio de parada. El tamaño de la población indica el número de cromosomas en la población (en una generación). Si hay muy pocos cromosomas, el algoritmo tendrá pocas posibilidades de realizar un cruce y solo se explorará una pequeña parte del espacio de búsqueda. Por otro lado, si hay demasiados cromosomas, el algoritmo explorará una mayor variedad de soluciones posibles, pero el tiempo de ejecución aumenta excesivamente.

La metodología sigue los siguientes pasos.

1. Genera aleatoriamente la población inicial de n cromosomas, en los que cada gen es una posible solución al problema.
2. Calcula el tiempo primario y de respaldo de cada relé de acuerdo con cada cromosoma.
3. Evaluar la aptitud f(x) de cada cromosoma x en la población.
4. Crear una nueva población en cada iteración:
5. Ejecutar el algoritmo nuevamente usando la nueva población.
6. Terminar el algoritmo si se cumplen los criterios de detención; de lo contrario, repita los pasos 2-5 [32].

B. Métodos de Optimización TLBO

En [18], se menciona el método Teaching Learning Based Optimization (TLBO) método utilizado para determinar el time dial setings (TDS) del relé de sobrecorriente. Este algoritmo se basa en el comportamiento de una clase, donde existen alumnos y profesor, existiendo una dependencia de los alumnos hacia la calidad del profesor, un buen profesor ayuda a que los estudiantes sean buenos, y los compañeros motivan a los demás estudiantes lo sean también, este proceso es repetitivo y continuo de mejora, donde cada alumno trata de seguir al profesor y cada alumno interactúa entre sí. Esta es la metodología del TBLO, que se desarrolla en dos partes, la inicialización, donde se generan aleatoriamente N números de dimensión D, se forma una matriz de vectores aleatorios, donde cada vector corresponde a una solución, esta matriz se denomina el aprendiz, la dimensión corresponde a los temas que se ofrecen en la clase, cada alumno tiene un vector tridimensional que se le ha asignado, en dos fases, la fase de profesor y la fase de alumno. Al igual que cualquier otro algoritmo de búsqueda aleatoria, el TLBO comienza con el procedimiento de inicialización. En este procedimiento, se generan N números aleatorios de soluciones iniciales dentro del espacio de búsqueda. Así, en esta fase de inicialización, se genera N número de vectores aleatorios donde, cada vector es de dimensión D. Por lo tanto, se genera aleatoriamente una matriz de N filas y columnas D, dentro del espacio de búsqueda. Cada vector es una solución probable en el espacio de búsqueda y se conoce como aprendiz. N representa el tamaño de la población o el "tamaño de clase", El valor D representa el número de "temas o cursos ofrecidos", que es igual a la dimensional dad del problema tomado. Cada alumno está representado como un vector tridimensional en la búsqueda. El profesor evalúa el rendimiento de la clase y busca entre los estudiantes al mejor y el proceso se repite de manera que el promedio de la clase avanza. El vector que contiene a los mejores de la clase forma un nuevo conjunto de vectores mejorados, el proceso termina cuando se ha mejorado al nivel esperado, el ultimo vector contiene los tiempos óptimos para la calibración del relé de sobrecorriente [18].

C. Métodos de Optimización PSO Particle Swam Optimization

Esta técnica de optimización consiste en el comportamiento que tienen las partículas, y su relación con la velocidad. Las partículas se mueven a una velocidad asociada y se definen funciones objetivo, que relacionan el movimiento hacia una mejor posición, el problema se resuelve cuando se entregan resultados de convergencia y una partícula ha pasado de una posición X1 hacia una mejor posición Xi [28].

D. Métodos de Optimización Computacional, Microprocesados de alto nivel

Los métodos numéricos se aplican para los relés de sobrecorriente y distancia. El principal beneficio sobre los relés de sobrecorriente es el bajo costo y la capacidad de multifunciones en un solo producto. Dentro de este tipo de relés se se monitorean las señales de voltaje y corriente, además se tiene un módulo que está calculando las zonas de protección no solo con los valores RMS de las mediciones sino con las mediciones de amplitud y ángulo [34], [35] .

E. Métodos de distribución de parámetros.

En [27], se explica un modelo basado en la distribución de parámetros de las líneas largas y el diseño de un algoritmo computacional capaz de variar la zona de protección en base a la distribución de voltaje. Una línea larga necesita modelarse con sus parámetros distribuidos, existen protecciones para líneas de transmisión que operaran en extra alto voltaje, y ultra alto voltaje EHV/UHV. En estas metodologías se necesita de bajas muestras de frecuencia, para modelar la L/T y realizar simulaciones y determinar cuándo una falla ocurre, en que zona se encuentra, y garantizar estabilidad ante fallas externas, si comparamos la protección de parámetros distribuidos, con el modelo de transmisión de parámetros concentrados, se observa que las actuaciones erróneas se dan el segundo caso.

F. Métodos de Inteligencia Artificial

Otro método basado en AI inteligencia artificial y NAI, Natural Inspire Algoritmos se utiliza para la coordinación de la protección sobre corriente [28]. Existe un método de coordinación óptima no lineal denominada JAYA que se usa para encontrar el óptimo tiempo de apertura de trip del relé de sobrecorriente. Existe una diferencia de este método respecto a los métodos convencionales y técnicas de programación simple, el método de algoritmos genéticas el PSO logrando encontrar la óptima calibración de los relés, mientras que el JAYA, es un algoritmo que se basa en una lucha donde existe un ganador y un perdedor, de este modo los ganadores son considerados en la optimización, mientras los perdedores son descartados [36].

G. Métodos de lógica Difusa

La metodología de lógica difusa es un método matemático de optimización que se adapta al mundo real, debido a que tiene cuantificadores que son capaces de interpretar inferencias. Esta metodología se utiliza cuando la complejidad del proceso es muy alta, y no existen modelos matemáticos precisos. Además, se aplica también para problemas altamente no lineales y cuando el fenómeno se comporta sin seguir una lógica predecible. Aplicando esta metodología a la teoría de protecciones se realiza una fusión entre el método de algoritmos genéticos y el de lógica difusa, conocido como Fuzzy-GA. Esta metodología utiliza los resultados entregados en GA, y se definen dos funciones objetivas, para reducir el TMS (mínimo time set).

En la figura 4 se realiza un resumen de las metodologías aplicadas para la optimización de relés de sobrecorriente.

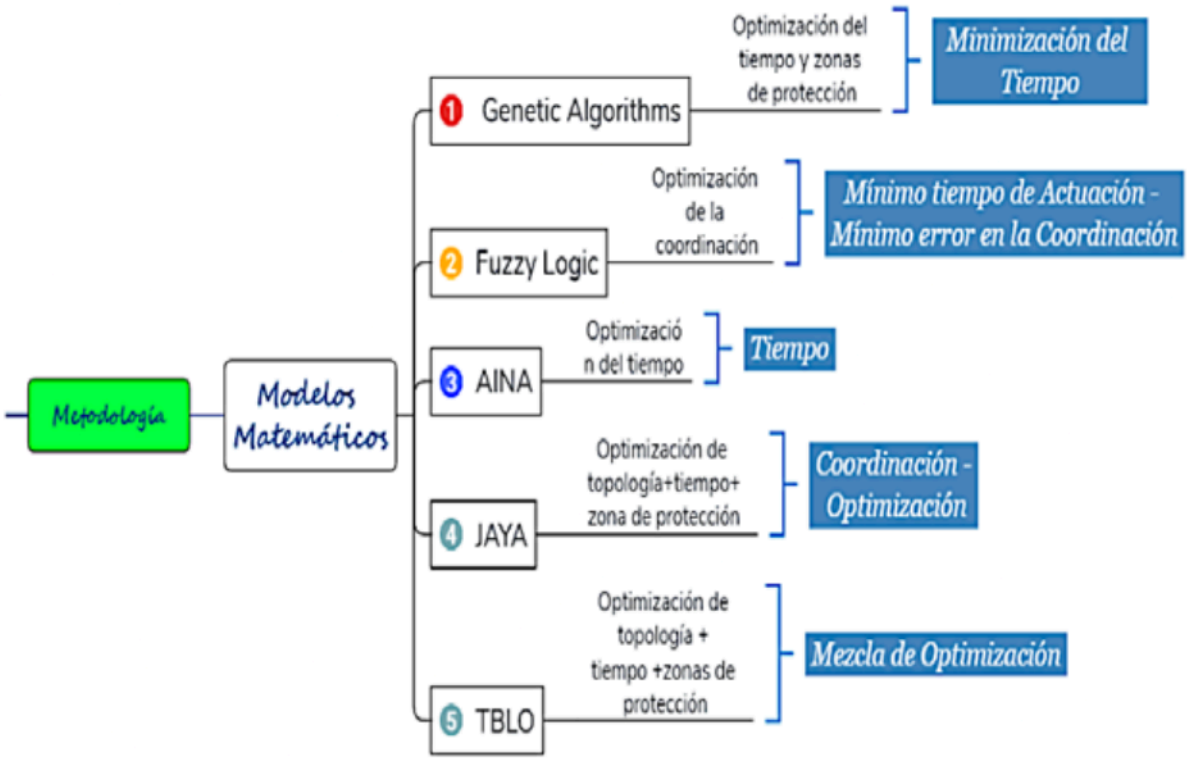


Fig. 4. Metodologías Aplicadas para la optimización de los relés de sobrecorriente

V. Conclusiones

- La protección adaptativa es una filosofía de protección que permite y busca realizar ajustes en las diferentes funciones de protección para que estén en sintonía con las condiciones de los sistemas de potencia predominantes. En la actualidad la tendencia es ir hacia la digitalización, una protección adaptativa actúa correctamente dentro de su zona de protección si esta ha sido correctamente sesteada, la confiabilidad se garantiza teniendo equipos de protección redundantes. Se aclara además que el sistema de trasmisión posee cantidad de equipos instalados geográficamente en diferentes puntos y una protección fija no puede estar evaluando las condiciones del sistema en cada instante, mientras que una protección adaptativa hace esto en milésimas de segundo, observando estados y condiciones de estrés eléctrico con una frecuencia de muestreo.

- Existen técnicas de control adaptativo en el cual el problema consiste en obtener la mejor adaptación de la región de la zona protección, utilizando algoritmos de optimización para hallar asocialmente los límites de corriente y voltaje para delimitar la zona. Esta es una técnica que ha superado las series de compensación y que se aplica para líneas de transmisión de Ultra alto Voltaje y válida para sistemas interconectaos con áreas claramente definidas.

- Las investigaciones indican que el método más utilizado para atacar el problema de condiciones extremas consiste en protecciones adaptativas, con la utilización de métodos computacionales desarrollados con sistemas micro-procesados ultrarrápidos capaces de medir, simular y cambiar parámetros de protección en milésimas de segundos.

- La optimización en coordinación de protecciones de sobrecorriente y distancia está orientada en su mayoría a la optimización de la selectividad, velocidad, precisión de actuación de los relés de tiempo y apertura y cierre, determinación de zonas óptimas. La metodología más utilizada es el método de algoritmos genéticos, donde se encuentra un mínimo TDS time dial seting, y un mínimo tiempo de descoordinación respecto al valor real.

- Existen problemas que distorsionan la calibración de protecciones que deben ser analizados con mayor detalle y son el origen de investigaciones futuras como error de la actuación de la protección de distancia debido a la compensación serie y paralelo de potencia en un colapso de voltaje, el cambio de la capacidad electrostática, influencia del efecto capacitivo en líneas largas, influencia en el cálculo de la impedancia efecto de la falla a tierra en sistemas aterrizados. Y problemas en la calibración, de fenómenos asociados a condiciones extremas que pueden causar una mala actuación debido a la contaminación UVH producidas por ondas transitorias viajeras, donde el efecto distorsiona el comportamiento del voltaje y la corriente, evitando que la protección sea selectiva en la apertura de una falla.

- Este paper identifica las metodologías utilizadas para la coordinación de protecciones, así como los principales problemas y sus consecuencias, estudios futuros deberán encontrar funciones objetivo que logren involucrar escenarios críticos como desconexiones en cascada y /o un desastre natural que llevan al SEP a un estado de emergencia.

- Las metodologías analizadas y las funciones objetivo, en su mayoría se aplican a líneas cortas. Los efectos y fenómenos que ocurren en líneas de transmisión con parámetros distribuidos junto a fallas de alta impedancia a tierra son descartados en la mayoría de metodologías por lo tanto se deberá incursionar investigaciones en este sentido.

- Se ha realizado una investigación profunda y exhaustiva sobre la coordinación del relé de sobrecorriente y se resumen los métodos más utilizados para coordinar la protección sobrecorriente, la protección distancia, y la combinación de los dos. En el presente documento se realiza una descripción general de las metodologías, se recopila la información para identificar el algoritmo e identificar el proceso de optimización.

- Los métodos de optimización para relés de distancia y sobrecorriente permiten determinar el time dial seting TDS y el tipo de curva en cada relé. El algoritmo GA puede ser aplicado en diferentes protecciones, sobre todo en las topologías de sistemas que utilizan relé de sobre corriente debido a la simplicidad en la aplicación del procedimiento. Sin embargo, también existen otros métodos propuestos como el método de PSO híbrido que fue propuesto y tuvo mejor éxito que la programación lineal. Al comparar los métodos de PSO y GA se puede concluir que estos son iguales para una red de similares características, pero se debe aclarar que PSO realiza una coordinación con menos población y menos tiempo de iteración.

VI. Referencias

B. B. Khandare and B. T. Deshmukh, "A literature review on wide area protection technique using PMU," 2017 Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput., pp. 1449–1454, 2017.

S. Liberman, "f) Dynamic Braking tlaunc Uspi," no. 6, pp. 2104–2116, 1978.

S. Dambhare, S. A. Soman, and M. C. Chandorkar, "for Transmission-Line Protection," vol. 24, no. 4, pp. 1832–1841, 2009.

B. Oral and F. Dönmez, "The Impacts of Natural Disasters on Power Systems : Anatomy of the Marmara Earthquake Blackout," vol. 7, no. 2, pp. 107–118, 2010.

M. Bastami, "SEISMIC ASSESSMENT OF MEDIUM AND HIGH VOLTAGE POWER," pp. 1–8, 2008.

Y. Q. Xia and A. K. David, "Adaptive relay setting for stand-alone digital distance protection - Power Delivery, IEEE Transactions on," vol. 9, no. 1, pp. 480–491, 1994.

"Battling the Extreme : A Study on the Power System Resilience," vol. 105, no. 7, pp. 1253–1266, 2017.

Y. Wang, S. Member, C. Chen, J. Wang, S. Member, and R. Baldick, "Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters — A Review," vol. 31, no. 2, pp. 1604–1613, 2016.

R. Mohammadi Chabanloo and M. Ghotbi Maleki, "An accurate method for overcurrent–distance relays coordination in the presence of transient states of fault currents," Electr. Power Syst. Res., vol. 158, pp. 207–218, 2018.

H. C. Kiliçkiran, İ. Şengör, H. Akdemir, B. Kekezoğlu, O. Erdinç, and N. G. Paterakis, "Power system protection with digital overcurrent relays: A review of non-standard characteristics," Electr. Power Syst. Res., vol. 164, no. March, pp. 89–102, 2018.

H. Pineda and J. L. Flores, "Macagua-Callao-Claritas 400," vol. 00, pp. 3–6, 2006.

H. Kang, S. Subramanian, F. Hassan, and L. Yao, "Distance protection under extreme conditions," 10th IET Int. Conf. Dev. Power Syst. Prot. (DPSP 2010). Manag. Chang., pp. 152–152, 2010.

T. Penthong, "An Efficient Method of Automatic Distance Relay Settings for Transmission Line Protection," pp. 5–8, 2013.

T. Smith, M. E. Lacedonia, and S. Pitts, "Review of Application of Ground Distance Protection."

G. Equipments and H. District, "Traveling Waves based Protection Relaying of Power Lines," pp. 2467–2471, 2011.

A. Halim, A. Bakar, F. Mat, S. Yusof, and M. Ridzal, "Electrical Power and Energy Systems Analysis of overload conditions in distance relay under severe system contingencies Simulated Power Swing Loci (R2) vsActual Record (R3)," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 32, no. 5, pp. 345–350, 2010.

S. Biswas and P. K. Nayak, "State-of-the-art on the protection of FACTS compensated high-voltage transmission lines : a review," vol. 3, pp. 21–30, 2018.

M. Singh, B. K. Panigrahi, and A. R. Abhyankar, "Electrical Power and Energy Systems Optimal coordination of directional over-current relays using Teaching Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 50, pp. 33–41, 2013.

A. Lashkar Ara, A. Kazemi, and S. A. Nabavi Niaki, "Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 27, no. 2, pp. 481–490, 2012.

S. A. Ahmadi, H. Karami, and B. Gharehpetian, "Comprehensive coordination of combined directional overcurrent and distance relays considering miscoordination reduction," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 92, pp. 42–52, 2017.

K. Zare, S. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 9, no. 12, pp. 1455–1463, 2015.

L. G. Pérez, S. Member, A. J. Urdaneta, and S. Member, "Optimal Computation of Distance Relays Second Zone Timing in a Mixed Protection Scheme with Directional Overcurrent Relays," vol. 16, no. 3, pp. 385–388, 2001.

A. F. Z. S. Corp, "Adaptative Transmission System Relaying," vol. 3, no. 4, pp. 1436–1445, 1988.

D. Solati Alkaran, M. R. Vatani, M. J. Sanjari, G. B. Gharehpetian, and M. S. Naderi, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Networks by Using Fuzzy-Based GA Method," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 3091–3101, 2018.

J.- Kim, "Transmission Line Protection," vol. 00, no. 1, pp. 1465–1468, 2000.

A. Z. Saleem, Z. A. Khan, and A. Imran, "Algorithms and hardware design of modern numeric overcurrent and distance relays," 2nd Int. Conf. Electr. Eng. ICEE, no. March, pp. 7–11, 2008.

L. T. Lines, G. Song, X. Chu, S. Gao, X. Kang, and Z. Jiao, "on Distributed Parameter Model for," vol. 28, no. 4, pp. 2116–2123, 2013.

M. H. Hussain, S. R. A. Rahim, and I. Musirin, "Optimal Overcurrent Relay Coordination : A Review," Procedia Eng., vol. 53, pp. 332–336, 2013.

D. Ramaswami, M. J. Damborg, S. S. Venkata, A. K. Jampala, and J. Postforoosh, "Enhanced algorithms for transmission protective relay coordination," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 1,no. 1, pp. 280–287, 1986.

S. S. V. R. Ramaswami, M.J Damborg, "Coordination of Directional Overcurrent Relays in," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 5, no. 1, pp. 64–71, 1990.

H. Askariana Abyaneh, S. Sadat Hashemi Kamangar, F. Razavi, and R. Mohammadi Chabanloo, "A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent relays in a mixed protection scheme with distance relays," Proc. Univ. Power Eng. Conf., 2008.

M. H. Marcolino, J. B. Leite, and J. R. S. Mantovani, "Optimal Coordination of Overcurrent Directional and Distance Relays in Meshed Networks Using Genetic Algorithm," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 9, pp. 2975–2982, 2015.

G. Idarraga-Ospina, N. A. Mesa-Quintero, J. A. Valencia, A. Cavazos, and E. Orduna, "Directional overcurrent relay coordination by means of genetic algorithms of Chu–Beasley," IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng., vol. 13, no. 4, pp. 522–528, 2018.

B. C. P. E and C. E. Houston, "Everyday Modern Protective Relay Engineering Applications : Review of Interesting Electric Power Utility Events , Challenges , & Concerns," pp. 22–42, 2012.

E. Bartosiewicz, R. Kowalik, and M. Januszewski, "Overview and Test Results of Modern Pilot Schemes for Coordination of Line Distance Protection Relays," 2013.

H. Can, İ. Ş, H. Akdemir, B. Kekezo, O. Erdinç, and N. G. Paterakis, "Power system protection with digital overcurrent relays : A review of non- standard characteristics," vol. 164, no. July, pp. 89–102, 2018.

FICA

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

UTN