

DISEÑO DE PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

José Antonio Rosendo Macías
José Luis Martínez Ramos
Antonio Gómez Expósito
Jesús Riquelme Santos
Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Superior de Ingenieros

RESUMEN

Este artículo describe el diseño y desarrollo de dos prácticas de simulación de un sistema de transporte de energía eléctrica. Estas prácticas, realizadas por los alumnos de penúltimo curso de ingeniería eléctrica, requieren el uso de un paquete informático con elementos como las líneas de transmisión, y funciones como repartos de carga y despacho económico. De este modo, se proporciona al alumno una oportunidad para estructurar el conocimiento de las clases teóricas, así como para desarrollar habilidades en comunicación, trabajo en equipo y resolución de problemas.

ABSTRACT

This paper describes the design and development of two Power System class projects. These class projects, undertaken by senior electrical engineering students, requires a computer application with elements such as transmission lines, and tools like load flows and economic dispatch. In this way, the student has the opportunity to structure the knowledge from theory classes, as well as to develop skills in communication, team work and problem handling.

INTRODUCCIÓN

En una profesión eminentemente práctica como la del ingeniero es necesario, en la preparación y educación del alumno durante sus años de carrera, el contacto directo con situaciones prácticas reales. Esto no sólo refuerza y potencia los conocimientos del estudiante, sino que favorece y facilita su asimilación, a la vez que desarrolla la capacidad de inserción del futuro ingeniero en campos laborales específicos.

La correcta comprensión de las distintas actividades involucradas en la explotación de un sistema eléctrico, incluyendo la generación, transporte y suministro de energía eléctrica al usuario final, constituye una base fundamental en la formación de un ingeniero eléctrico. Por otra parte, la imposibilidad física de practicar con sistemas reales obliga utilizar herramientas de simulación, (Glover y Dow, 1990; Ranade, Tester y Singh, 1991), o, como ocurre en la

mayoría de las escuelas de ingeniería, a limitar su enseñanza a los aspectos puramente teóricos del problema.

De otro lado, la elaboración de trabajos o prácticas de clase, en los que se favorezca relación profesor-alumno mediante consultas y tutorías, es una herramienta para que el profesor pueda conocer mejor el grado de aprendizaje y asimilación de sus alumnos, tarea que no siempre sencilla cuando la enseñanza es únicamente teórica, impartida en grupos masificados y con exámenes teóricos como única información de los resultados de la comprensión y progreso del alumno durante el curso.

El hecho de que el estudiante deba enfrentarse a un problema de este tipo para resolver hace que sus conocimientos se afiancen con más profundidad. La posible aparición de dudas en el transcurso de la práctica hará que el alumno se ponga en contacto con el profesor tutor, a la misma, siendo éste el método más efectivo para garantizar un correcto aprendizaje, evitando lagunas y errores.

La meta principal de las prácticas propuestas ha sido favorecer la correcta asimilación por parte de los alumnos de una serie de conocimientos y técnicas que le serán útiles a lo largo de su vida profesional, relacionadas, tanto con la asignatura en cuestión, como con el quehacer diario de un ingeniero. Por un lado, se ha pretendido que el alumno se familiarice con el programa de simulación de un sistema eléctrico, favoreciendo de este modo el uso de recursos informáticos, como los de la propia Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, y que se enfrente a problemas realistas relacionados con la asignatura. Y por otro lado se ha pretendido que sea capaz de elaborar propuestas y plasmarlas en informes técnicos.

Así mismo, este tipo de prácticas supone una ventaja para el docente de la asignatura de Sistemas Eléctricos de Potencia, correspondiente a la titulación de Ingeniería Industrial, especialidad eléctrica, ya que le permite ir habituándose a los nuevos planes de estudio. Dichos planes, que se irán implantando en los próximos años, incorporan una nueva asignatura dedicada exclusivamente al aspecto de las prácticas en los sistemas eléctricos.

1. PREPARACIÓN Y PLANTEAMIENTO

Como etapa previa a la realización de las prácticas fue necesario seleccionar un paquete de simulación que se adaptase bien a estas necesidades docentes: que incluyese los elementos básicos de un sistema eléctrico así como las principales funciones necesarias. Todo ello evitando modelos demasiado complicados y utilizando una interface amigable con el usuario.

A través de una lista de correo electrónico, Power-Globe, especializada en el área de Sistemas de Potencia, dentro de la Ingeniería Eléctrica, se tuvo conocimiento del paquete de simulación PowerWorld Simulator, realizado por la empresa PowerWorld Corporation (<http://www.powerworld.com>), el cual reúne holgadamente los requisitos citados, incluyendo un agradable interface gráfica con el usuario.

Tras comprar la adecuada licencia de uso de dicho paquete, se procedió a establecer el enunciado de dos prácticas: la primera de ellas debía centrarse en los aspectos relativos a su funcionamiento seguro y eficiente de un sistema eléctrico; mientras que la segunda debería introducir factores de coste y de valoración económica de intercambios energéticos.

Como escenario para ambas prácticas se optó por una red que resultara familiar y conocida al alumno, usándose para ello un esquema simplificado a los niveles de tensión de 400 y 220 KV, de la red en la que está inmersa la ciudad de Sevilla.

1.1. DATOS DEL SISTEMA

El sistema eléctrico tratado se representa en la figura 1, estando compuesto de :

- Un área interna a controlar, constituida por 6 nudos eléctricos, dos de los cuales son de generación: en el nudo 1 está la central nuclear de Almaraz y en el 5, la central hidráulica de bombeo de Guillena. El consumo en el área interior se concentra en los nudos 5 (Guillena) y 6 (subestación de Don Rodrigo).
- Un área externa, modelada mediante un generador (G3), conectado al nudo 7 ("Slack" de la simulación), y un consumo externo; estando unida al área interna por dos líneas de interconexión (L1 y L6).

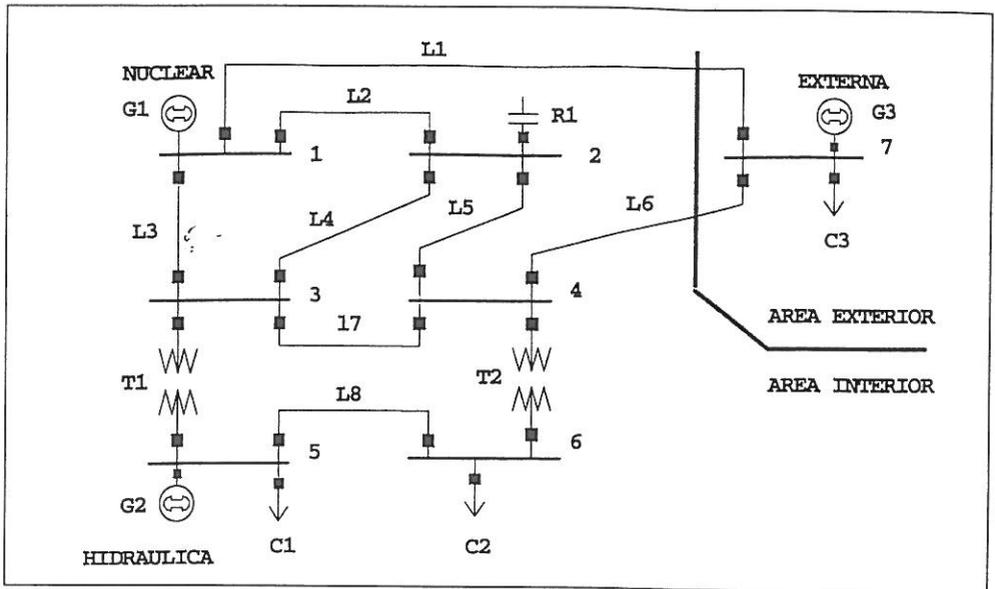


Figura 1: Sistema Eléctrico objeto del estudio.

1.1.1. Parámetros generales

La frecuencia del sistema es de 50 Hz, los niveles de tensión 400 kV y 220 kV, y la potencia base 100 MVA.

1.1.2. Líneas

El sistema se compone de 8 líneas eléctricas cuyos parámetros se indican en la tabla 1. En dicha tabla se proporcionan la resistencia (R), reactancia (X) y susceptancia shunt (B) totales de cada línea, así como la potencia máxima que pueden transportar (MVA).

Tabla 1: Parámetros de las líneas.

Línea		R	X	B	Smax
L1	1-7	8.0	80.0	0.879	1000
L2	1-2	3.2	30.4	0.394	1000
L3	1-3	8.0	83.2	0.912	1000
L4	2-3	6.4	62.4	0.771	1000
L5	2-4	8.0	83.2	1.075	1000
L6	7-4	4.8	44.8	0.482	1000
L7	3-4	1.6	22.4	0.274	800
L8	5-6	1.0	12.1	0.289	800

1.1.3. Transformaciones

Existen dos transformadores de 400 kV a 220 kV de idénticas características, con una potencia nominal de 1200 MVA y reactancia de cortocircuito del 12% cada uno. Los dos transformadores están dotados de 21 tomas de regulación (incluida la nominal) que permiten cambiar la relación de transformación en $\pm 10\%$ con pasos discretos del 1%.

1.1.4. Generación

Existen tres centrales de generación, cuyas características se indican en la tabla 2. Para la realización de la primera práctica, se recomendó dejar cualquier dato desconocido (coste constante de inercia, etc.) al valor proporcionado por defecto.

Tabla 2: Datos de generación.

Central	Tipo	Pg (MW)	Qg (Mvar)
G1	Nuclear	$500 \leq P_g \leq 2000$	$-250 \leq Q_g \leq 500$
G2	Bombeo	$-300 \leq P_g \leq 300$	$-100 \leq Q_g \leq 500$
G3	$i?$	$0 \leq P_g \leq 5000$	$-1000 \leq Q_g \leq 1000$

1.1.5. Consumo

Se simularon dos escenarios de consumo, correspondientes a la punta y valle de consumo previstos. Los consumos para dichos escenarios se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Datos de consumo.

Consumo	Nudo	Consumo en punta		Consumo en valle	
		Pc (MW)	Qc (Mvar)	Pc (MW)	Qc (Mvar)
C1	5	1000	150	100	-100
C2	6	1000	150	100	-100
C3	7	1000	200	0	0

1.1.6. Otros elementos de control

Como elemento de auxilio en el control de tensiones, se dispone de una única reactancia de 300 Mvar nominales en el nudo 2 (subestación de ValdeCaballeros). Es un elemento todo o nada; solo se puede decidir su conexión/desconexión.

1.2. PRIMERA PRÁCTICA

El trabajo de la primera práctica estuvo centrado en familiarizarse con el programa, introducir los datos del sistema expuestos en el apartado anterior y realizar una serie de actuaciones en ambos escenarios de carga, que condujesen al cumplimiento de unas especificaciones:

- Tensiones de todos los nudos siempre por encima de sus valores nominales (1.00 p.u), con un límite del 5% de sobretensión (1.05 p.u).
- Generación/consumo de reactiva por parte de los generadores al mínimo posible no llegando en ningún caso a los límites establecidos.
- Intercambios de activa con el área vecina, mínimos.
- Intercambios de reactiva con el área vecina, nulos.

Fue necesario realizar un informe de explotación donde se analizase el estado resultante del sistema en las dos condiciones de carga previstas haciendo especial hincapié en el posible incumplimiento de los objetivos marcados.

En el citado informe debieron proponerse las líneas generales de la política a seguir para corregir los problemas existentes (variación de inyecciones de activa y reactiva en los nudos de generación, actuación sobre las tomas de los transformadores, conexión/desconexión de reactancias, realización de intercambios con el área vecina etc.).

Este informe debía ir acompañado de un disquete donde se recogiesen las simulaciones de los dos escenarios de carga planteados

1.3. SEGUNDA PRÁCTICA

En esta práctica debió abordarse el mismo sistema que en la práctica anterior, pero incluyendo consideraciones económicas. Para ello se proporcionaban las curvas de costes de los generadores G1 y G3.

Con ecuación de costes, en pts/hora $C_i = 10^3 \cdot (A + B \cdot P_i + C \cdot P_i^2)$

los coeficientes de los generadores son los que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Coeficientes de coste de los generadores.

Central	A	B	C
G1	200	0.9	0.0002
G3	100	2	0.0001

Respecto a la central hidráulica, se informó del rendimiento de ciclo de bombeo (energía turbinada/energía consumida en el bombeo), igual a 0.7.

En esta práctica se pidió un informe de explotación, con el estado del sistema en las horas punta y valle, los costes de generación del área interna, intercambios decididos (con las com-

pensaciones correspondientes), y el coste de las pérdidas del área interna. Así mismo, debieron indicar las actuaciones que tuvieron que realizar los alumnos para corregir posibles sobrecargas y tensiones fuera de límites. Todo ello, acompañado del correspondiente disco con las simulaciones realizadas.

2. DESARROLLO

Para la realización de ambas prácticas, fue necesario impartir un seminario de introducción al paquete informático de dos horas de duración en el que se ilustró el procedimiento seguir para el modelado del sistema así como el uso de las herramientas disponibles en el programa para el control de la red. Dicho seminario se impartió tras haber terminado en las clases teóricas todo el temario necesario para su correcta comprensión.

Simultáneamente a la preparación de dicho seminario, se instó a los alumnos a que se estructurasen en grupos de entre dos y cuatro miembros; si bien, debido a la flexibilidad que se adoptó a este respecto, finalmente hubo desde trabajos individuales hasta grupos de cuatro alumnos.

Desde un principio se ofreció a los alumnos la posibilidad de contactar con el profesor encargado de las prácticas mediante el uso del correo electrónico; cuyo uso estaba disponible para todos a través de los ordenadores del Centro de Cálculo de la Escuela. Ya desde ese momento dicho medio de comunicación se encontró muy concurrido, usando muchos de ellos incluso el correo personal del que disponían desde sus domicilios.

Los grupos que se formaron en un primer momento fueron sufriendo una evolución territorial, con la incorporación de alumnos nuevos a algunos de ellos y con la escisión por parte de otros; llegando finalmente a una configuración de 18 grupos, con tamaños como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Tamaño de los grupos.

Tamaño	No. De grupos
1	4
2	1
3	6
4	7

Estos grupos dispusieron para la realización de la práctica de los recursos informáticos del Centro de Cálculo de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla; que en este respecto fueron 150 ordenadores personales, mayoritariamente con microprocesado Pentium a 120 MHz, distribuidos en cinco aulas de acceso libre durante toda la jornada, en las que se había instalado el paquete de simulación *PowerWorld* por parte del personal de dicho centro de cálculo. La solución de que el programa estuviese disponible en todos los ordenadores citados se debe a que el acceso a ellos es compartido con el resto de los alumnos de centro. Pese a la disponibilidad de estos recursos, muchos grupos optaron por trabajar también en sus propios ordenadores para lo que usaron una versión académica de prestaciones limitadas que

los realizadores del programa facilitan a través de internet para usos como este. Dichas versiones estuvieron disponibles tanto accediendo a la página web de *PowerWorld Corporation*; como mediante accesos a la página web académica del profesor encargado de las prácticas.

Conforme los alumnos fueron trabajando en las prácticas, se fueron encontrando con multitud de problemas, para cuya resolución necesitaron la tutela del profesor. En esta etapa, el uso del correo electrónico tuvo una incidencia tan grande como la propia consulta presencial, consiguiendo un alto grado de satisfacción tanto por parte del profesor como de los alumnos. Dichas consultas han servido para una mejor asimilación de conocimientos, así como para proporcionar al profesor realimentación sobre el grado de aprendizaje de los alumnos.

3. EVALUACIÓN

En cuanto a aspectos de evaluación distinguiremos dos vertientes. Respecto a la que puede hacer el alumno, sólo se tiene la información obtenida durante las muchas consultas recibidas, en las que se pudo comprobar que estos consideraban la realización de este tipo de prácticas muy fructífera. No se tuvo oportunidad de realizar una encuesta formal entre el alumnado debido a cuestiones de tiempo, ya que al haber tenido que esperar mucho para que dispusiesen de los conocimientos necesarios, no tuvieron tiempo de acabarlas antes del final de las clases.

Respecto a la evaluación que el profesor hace del trabajo realizado por los distintos grupos, cabe destacar los buenos resultados conseguidos por la mayoría de ellos: sólo dos grupos recibieron una calificación de no apto en alguna práctica, tras lo que se les devolvieron los informes realizados para que corrigiesen errores y ampliaran trabajo.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En general, los grupos supieron encontrar buenas soluciones de funcionamiento para la red así como buenas transacciones energéticas, con una adecuada valoración de costes. En los informes presentados defendieron adecuadamente sus soluciones, sopesando aspectos como costes y seguridad en las soluciones propuestas, y mostrando tanto las virtudes de sus soluciones como las justificaciones de lo irremediable de soportar ciertos objetivos no conseguidos.

Por otra parte, de cara a una continuidad en la realización de estas prácticas en años sucesivos, sería necesaria su reformulación para evitar que los nuevos alumnos puedan usar las del presente curso como puntos de partida, con la consiguiente disminución de la utilidad de las nuevas. Al mismo tiempo, resulta recomendable adelantar el comienzo de las prácticas, por lo que al reformularlas, se debería hacer de modo que la primera pudiese comenzar con los conocimientos de los primeros meses del curso. De este modo podría conseguirse una terminación más temprana de los trabajos con lo que los alumnos podrían a su vez cumplimentar cuestionarios con sus opiniones al respecto, dentro del periodo de clases.

Además de estas consideraciones, durante el desarrollo del trabajo se ha hecho evidente la utilidad de controlar más estrictamente el tamaño de los grupos, de modo que exista una mayor homogeneidad. Al realizar el trabajo en grupos, es normal que se proceda a un reparto de las tareas, de modo que si los grupos son muy grandes, puede haber alumnos que lleguen a perder la visión de conjunto, por lo que debe evitarse ese caso. Por otro lado, los alumnos que

optaron por hacer la prácticas individualmente tuvieron que hacer más trabajo que sus compañeros de grupos mayores, siendo este punto difícil de incluir en las calificaciones de las prácticas.

BIBLIOGRAFÍA

GLOVER, J.D. y DOW, L.F. (1990). Student Design Projects in Power Engineering. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5, 4, 1390-1399.

RANADE, S.J., TESTER, J. y SINGH, J. (1991). A Power Systems Design Projects Class. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6, 1, 414-419.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Ciencias de la Educación (I.C.E.) de la Universidad de Sevilla, la concesión de una ayuda para la financiación de este trabajo dentro de la Convocatoria de Ayudas a la Docencia Universitaria.