

Propuesta didáctica de una maqueta interactiva para explicar el comportamiento de las líneas de transmisión de energía eléctrica

Didactic proposal of an interactive model to explain the behavior of electric power transmission lines

Héctor Silvio Llamo-Laborí, Ariel Santos-Fuentefria, Maykop Pérez-Martínez
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA HABANA JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA (CUJAE)
hllamo@electronica.cujae.edu.cu, asfuentefria@electronica.cujae.edu.cu, maykop@electronica.cujae.edu.cu

Abstract

La nueva transformación curricular llevada a cabo en la carrera de Ingeniería Eléctrica, responde a las demandas a nivel internacional y nacional para un egresado de esta carrera. Por esa razón, la cuestión principal sigue siendo bajo qué concepción y con qué procedimientos realizar los cambios fundamentales para desarrollar un proceso docente educativo comunicativo, independiente y creador. En este artículo se toma como ejemplo la asignatura de Sistemas Eléctricos I. Impartida en el primer semestre del cuarto año de la carrera de Ingeniería Eléctrica, en la Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE. El objetivo de este trabajo es, a partir de la utilización de una maqueta que modele el comportamiento de las líneas de transmisión, caracterizar el proceso enseñanza-aprendizaje como uno de los componentes del proceso educativo. El análisis se realiza desde una dimensión comunicativa, de manera que el tratamiento didáctico propicie en la práctica, una interrelación entre profesores y alumnos y alumnos entre sí. Esto permite la implicación del alumno en su propio proceso de aprendizaje. La presente propuesta didáctica considera, en el marco general del aprendizaje activo, la actividad experimental en la clase como una herramienta de trabajo sistemática y organizada, donde es necesario articular el uso metodológico de la clase-laboratorio para enriquecer el proceso de enseñanza-aprendizaje y la construcción del conocimiento.

The new curricular transformation carried out in the electrical engineering career, responds to the requirements at international and national level for a graduate of this career. For that reason, the main question remains under which conception and with what procedures to perform the fundamental changes to develop a communicative, independent and creative educational teaching process. This paper takes as an example the lecture of Electrical Systems I, given in the first semester of the fourth year of the Electrical Engineering degree, at the Technological University of Havana, CUJAE. The objective of this work is, from the use of a model for showing the behavior of transmission lines, to characterize the teaching-learning process as one of the components of the educational process. The analysis is carried out from a communicative dimension, so that the didactic treatment propitiates in the practice, an interrelation between professors and students and between students. This allows the students to be involved in their own learning process. The present didactic proposal considers, in the general framework of active learning, the experimental activity in the classroom as a systematic and organized working tool, where it is necessary to articulate the methodological use of the laboratory-class to improve the teaching-learning process and the construction of knowledge.

Palabras clave: Líneas de transmisión eléctrica, maqueta, sistemas eléctricos, proceso enseñanza-aprendizaje.
Keywords: Electric power transmission lines, model, electrical power systems, teaching-learning process.

1. Introducción

La enseñanza de la Ingeniería Eléctrica en Cuba comienza a principios del siglo pasado y cuenta, actualmente, con más de 100 graduaciones. En aquel entonces respondía a la necesidad del alumbrado de las ciudades y a las demandas de la incipiente industria cubana. Al triunfar la Revolución y con el entusiasmo de la Reforma Universitaria se establece la carrera en la Universidad de La Habana con tres especialidades: Control Automático, Telecomunicaciones y Potencia.

A partir de 1976, se estructura el Plan de Estudios ‘A’ y la Carrera de Ingeniería Eléctrica asume la formación en dos especializaciones: Electrificación Industrial y Redes y Sistemas Eléctricos. Posteriormente, en el curso 1982-1983 se aplicó el Plan de Estudios B con una sola especialidad: la Ingeniería Electroenergética.

A partir del curso 1990-1991 se pone en marcha el Plan de Estudios C, con la intención de formar un Ingeniero Electricista de perfil amplio, con conocimientos básicos sólidos que después pudiera especializarse y superarse en los cursos de posgrado. (Fandiño y Márquez, 2017) En la actualidad se aplica el Plan de Estudios D, caracterizado por la actualización de los conocimientos y un fuerte vínculo con la actividad laboral de la carrera gracias a la participación de las empresas y entidades del Ministerio de Energía y Minas, que le permite una fuerte vinculación con los problemas del sector productivo, en particular con los de la Unión Eléctrica (UNE).

En el Plan de Estudios D, como parte importante del modelo del profesional, se define, en el 2007: ‘El ingeniero electricista es un profesional de perfil amplio que desarrolla sus tareas en prácticamente todas las actividades económicas del país, pero con mayor peso en la rama eléctrica. Su objeto de trabajo es el conjunto de los medios técnicos (equipos, instalaciones y sistemas) empleados en la generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica’ (MES, 2009).

Sistemas Eléctricos I es la primera asignatura de la especialidad que reciben los alumnos de la carrera de Ingeniería eléctrica. La misma tiene seis temas, todos relacionados con las redes de transmisión. Ellos son:

1. Diagramas monolineales. Redes de transmisión y subtransmisión.
2. Curvas de Carga. Factores que caracterizan su comportamiento.
3. Parámetros eléctricos de las líneas de transporte de energía eléctrica.
4. Flujo de cargas en redes radiales y malladas.
5. Control de la tensión y la potencia reactiva en los Sistemas Eléctricos de Potencia.
6. Control de la frecuencia en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

Los objetivos del proceso de enseñanza-aprendizaje constituyen los fines o resultados, previamente concebidos como un proyecto abierto y flexible, que guía las actividades de profesores y estudiantes para alcanzar las transformaciones necesarias en estos últimos. (Capote, Rizo, y Bravo, 2016). Además de esta característica, juega una función de orientación dentro del proceso de enseñanza- aprendizaje, lo que equivale a decir que influye en el desenvolvimiento de los restantes elementos de este proceso, cumpliendo las funciones siguientes:

- Es el elemento didáctico en el que se plasma y se concreta la intencionalidad educativa.
- Influye en el comportamiento del resto de los componentes y estos, en relación de subordinación y coordinación, influyen sobre el mismo.
- Orienta la actividad de profesores y estudiantes pues, al especificar el fin a lograr, guía la estructuración del proceso, estableciendo hasta qué nivel llegar en el desarrollo previsto.
- Constituye un criterio de valoración de la efectividad o calidad del proceso, pues permite, junto con otras determinaciones procedentes de la práctica, evaluar las acciones logradas en los estudiantes, la propia actividad del profesor y la programación previamente planificada en su proceso de realización comparando las diferencias alcanzadas entre el nivel de entrada y salida de los estudiantes (Bravo y Cáceres, 2000) (Campos y Moya, 2011).

Partiendo del supuesto de que el alumno tiene un rol central en la construcción de su propio conocimiento, la estrategia didáctica debería proveer tantas instancias de participación estudiantil como sean posibles. En particular, es necesario que la metodología de enseñanza:

- Reconozca y afronte las ideas previas que los alumnos tienen sobre el tema que se va a desarrollar.
- Aproveche la actividad experimental como recurso didáctico para promover el hábito de la observación, la medición y la interpretación de los procesos, la extracción de conclusiones y la formación de modelos.
- Fomente el trabajo grupal y la puesta en común de las producciones (Sirur y Benegas, 2008) (Páez, 2017).

De acuerdo con estos principios, se ha elegido la estrategia, de que, a partir del objetivo de la asignatura declarado en los planes de estudios que actualmente están en vigor (plan D), que como ya se mencionó es el elemento rector del proceso de enseñanza-aprendizaje, explicar el funcionamiento de la maqueta propuesta en sus diferentes prácticas demostrando que la utilización de modelos físicos de las líneas de transporte de energía eléctrica (LTEE), sirve para mejorar la comprensión de los aspectos teóricos que, sobre el comportamiento eléctrico de las LTEE, se imparten en la asignatura Sistemas Eléctricos I del cuarto año de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE, influyendo de manera positiva en el aprendizaje de los estudiantes.

2. Materiales y métodos

Dada la importancia y la necesidad que se tiene de implementar una metodología didáctica cumpliendo con el objetivo general de la asignatura de sistemas eléctricos I, surgió este trabajo, en el cual se revisaron diferentes documentos como: los planes de estudios en vigor, los planes de clases de cursos anteriores donde la maqueta ya se había utilizado, se realizaron entrevistas a los estudiantes ya egresados y los que actualmente están cursando la carrera, también se realizaron diferentes reuniones metodológicas, con los profesores de la asignatura, para desarrollar las diferentes tareas que se proponen con la maqueta y cómo llevarlas a cabo para obtener los resultados de mayor utilidad para los estudiantes. Por otra parte se tuvieron como referentes trabajos realizados por diferentes autores donde exponen la importancia de la utilización de laboratorios virtuales como herramienta para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje, como son: (Lázaro, Rodríguez, y Olivas, 2018), (Arévalo y Pulido, 2016) y (Carlos Roldán-Blay, 2017).

3. Discusión y Resultados

Del trabajo metodológico realizado se obtuvo la propuesta de las diferentes tareas que se proponen desarrollar en la asignatura de Sistemas Eléctricos I con la maqueta que representa el modelo físico de una línea de transmisión con efecto Ferranti apreciable (Llamo H. S., 2016).

3.1. Modelo activo. Descripción

En los sistemas eléctricos de potencia como el de Cuba existen líneas de transporte de energía eléctrica (LTEE) que operan con tensiones de 220, 110, 34.5, 13.2 y 0.120/0.240kV en las redes de transmisión, subtransmisión y distribución primaria y secundaria respectivamente. En los temas 5 y 6 de la asignatura Sistemas Eléctricos I se explican las características de los parámetros de estas líneas y de su operación en estado estacionario. La Figura 1. muestra el circuito equivalente de una línea de transmisión a 110 ó 220kV representada por un circuito Π , llamado así por su parecido con dicha letra griega. A partir de la Figura 1 se construye y explica el diagrama fasorial de dicha línea mostrado en la Figura 2 (Llamo, 2015).

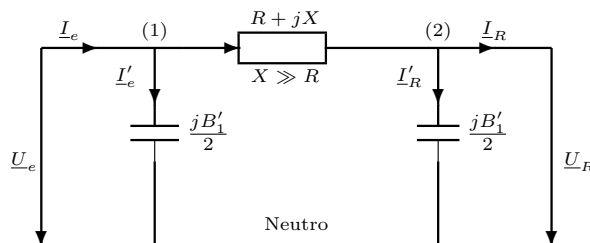


Figura 1: Circuito Π de una línea de transmisión de energía eléctrica.

En el diagrama fasorial de la Figura 2:

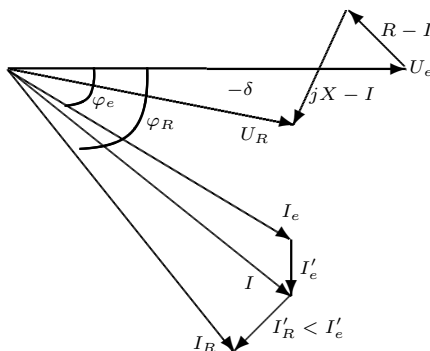


Figura 2: Diagrama fasorial de una línea de transmisión representada por su circuito Π .

- Las corrientes disminuyen del recibo al envío por el efecto de la capacitancia de la línea.
- El ángulo entre las tensiones del envío y del recibo se llama ángulo de potencia y se designa por la letra griega δ .
- φ_e y φ_R son los ángulos del factor de potencia del envío y del recibo.
- En este caso particular, la corriente capacitiva del recibo es menor que la del envío porque la tensión del recibo es menor que la del envío.

- La corriente capacitiva del envío, I'_e , está a 90° en adelante de la tensión del envío U_e .
- La corriente capacitiva del recibo, I'_R , está a 90° en adelante de la tensión del recibo U_R .

Si la línea es a baja tensión (BT), por ejemplo, 120/240V, el circuito equivalente que la representa es como el de la figura 1, llamado Simple Impedancia por carecer de las capacitancias del envío y el recibo, pero en su parámetro serie, la resistencia R es mucho mayor que la reactancia jX . Por ejemplo, una acometida monofásica, formada por dos conductores calibre 8AWG, torcidos entre sí, a 120V, de 15m de largo, tiene una impedancia serie $Z = 0.040 + j0.013\Omega$ donde $R/X = 3.076$. En este tipo de circuito, el diagrama fasorial, si se conocen las condiciones del envío es como el de la Figura 3. Donde:

1. Hay una sola corriente porque no hay capacitancia.
2. El ángulo δ es positivo mientras que en alta tensión es negativo.
3. φ_e y φ_R son los ángulos del factor de potencia del envío y del recibo.
4. La caída de tensión en la resistencia es tres veces mayor que en la reactancia.

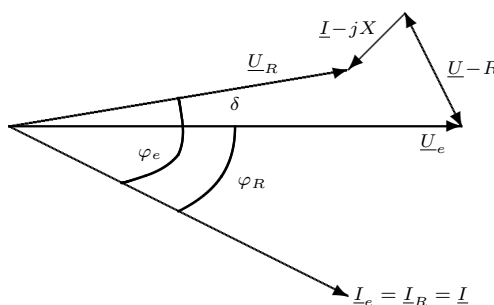


Figura 3: Diagrama fasorial de una acometida de 15m de largo a 120V.

3.2. Modelo físico activo de las LTEE

Para lograr una mejor comprensión del comportamiento de las tensiones y las corrientes en una LTEE e insistiendo en que es mejor ver una vez que escuchar cien veces, se desarrolló un modelo de la línea en una maleta, fácil de transportar hacia el aula, con las dimensiones mostradas en la Figura 4 y un peso de 8kg.

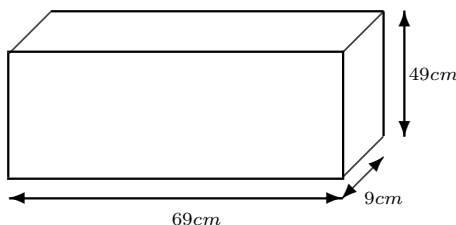


Figura 4: Dimensiones del modelo físico de las LTEE a 220 000, 13 200 y 120V.

La Figura 5 muestra una foto de la maleta, donde se modela una línea de transmisión a $220kV$.



Figura 5: Modelo activo de la línea compacta a $220kV$ Juraguá Camagüey, con $325km$ diseñada en Cuba, pero no construida.

3.3. Descripción de la línea compacta a $220kV$ modelada de forma activa

En Cuba, los ingenieros de la antigua Unión Soviética propusieron extraer la energía de la central electronuclear (CEN) que se construiría en Juraguá, provincia de Cienfuegos, con una capacidad instalada de $960MW$, mediante una línea doble circuito a $500kV$. Un estudio realizado por ingenieros de la antigua Empresa Eléctrica cubana, hoy Unión Eléctrica (UNE), demostró que dicha extracción podía realizarse con dos líneas compactas, a $220kV$ con tres conductores por fase.

Cada circuito estaría montado en torres de acero con la configuración mostrada en la Figura 6-a). La CEN no fue terminada y la línea fue solo un proyecto, pero se construyó otra línea compacta similar, a $220kV$, pero con dos conductores por fase que opera satisfactoriamente desde 1981 entre Cueto y Punta Gorda, provincia de Holguín. Se denominan líneas compactas a aquellas que sus estructuras se diseñan con distancias entre las fases menores que las de las líneas normales. Por ejemplo, la línea Cueto Punta Gorda tiene una separación entre las fases más cercanas de $3m$, mientras que en la línea no compacta Renté Holguín, a $220kV$ la distancia mínima es de $6.3m$. El acercamiento de las fases disminuye la reactancia inductiva, aumenta la susceptancia capacitiva y por ende mejora sustancialmente el comportamiento eléctrico de la línea porque reduce las pérdidas de potencia reactiva, la caída de tensión y aumenta su carga-bilidad.

En el modelo activo de la Figura 5 se ejecutó un circuito de la línea Juraguá Camagüey cuya configuración se muestra en la Figura 6-a) con los siguientes datos:

- Longitud $325km$.
- Tres conductores de aluminio reforzado con acero por fase de $150mm^2$ con una resistencia de $0.219\Omega/km$, un diámetro de $16.8mm$ y un radio medio geométrico de $6.82mm$.

Sus parámetros equivalentes por fase se muestran en el circuito II Equivalente de la Figura 6-b).

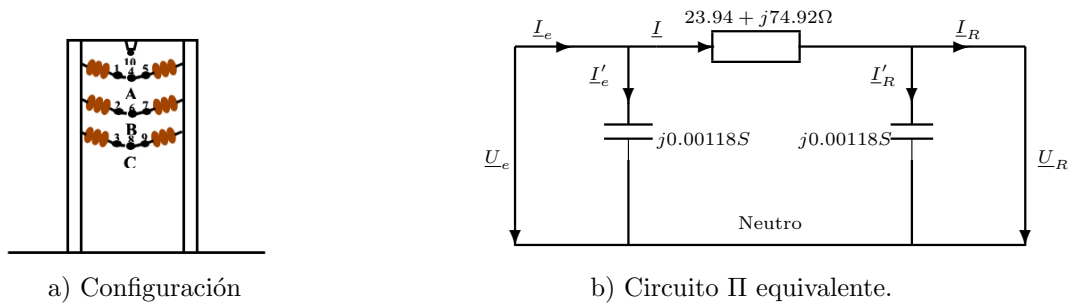


Figura 6: Configuración y parámetros del circuito II equivalente de la línea Juraguá Camagüey a 220kV. Los parámetros se calcularon con el paquete de programas PARLINC (Llamo, 2016).

El modelo activo de la línea Juraguá Camagüey a 220kV y 325km se muestra en la Figura 7 y los instrumentos de medición conectados en la maqueta se muestran en la Figura 8.

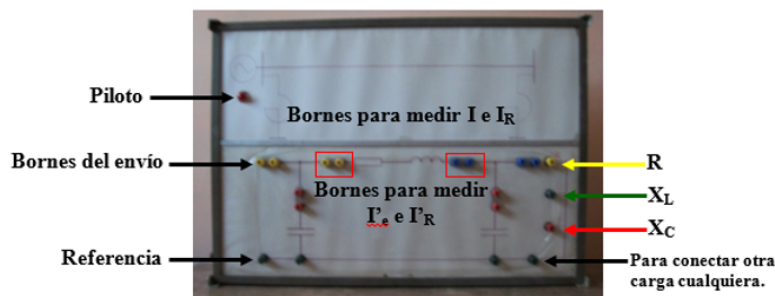


Figura 7: Modelo activo de la línea Juraguá Camagüey a 220kV y 325km con efecto Ferranti apreciable.



Figura 8: Voltímetro y miliamperímetro utilizados para hacer las mediciones.

3.4. Demostración del comportamiento de las líneas de transmisión mediante su modelo activo

Para demostrar a los estudiantes, de forma física y visible, cómo se comportan las tensiones y las corrientes de una línea de transmisión, se simularon cinco casos diferentes en el modelo físico activo de la maleta de la Figura 5. Los diferentes casos se explican relacionándolos entre sí, como se mostrará a continuación, y se van llenando en la pizarra las Tablas 1 y 2, a partir de las mediciones de tensión y corriente en la línea para que dicha información les quede a los estudiantes en sus notas de clase (Llamo H. S., 2016).

Tensiones en volt al neutro			
Condiciones de la línea	Envío (U_e)	Recibo (U_R)	Caída de tensión (porcentaje respecto a 120V)
Carga con factor de potencia (FP) en atraso	87	65	18
Mejorando el FP anterior	87	75	10
En vacío	87	115	-23
En vacío compensada	87	70	14
Circuito Simple Impedancia	87	60	22

Tabla 1: Mediciones de las tensiones de la línea para los cinco casos analizados.

Corrientes en el circuito II Equivalente de la línea en miliampere					
Condiciones de la línea	I_e	I'_e	I	I'_R	I_R
Carga con factor de potencia en atraso	135	100	162	60	180
Mejorando el factor de potencia anterior	121	100	149	70	167
Línea en vacío	224	110	115	115	00
Línea en vacío compensada	75	120	100	75	155
Circuito Simple Impedancia	175	00	175	00	175

Tabla 2: Mediciones de las corrientes de la línea para los cinco casos analizados.

Se modelan cargas con factor de potencia en atraso, es decir, aquellos en que la corriente forma un ángulo negativo con la tensión, porque es la carga típica de los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Se mejora el factor de potencia, es decir, se reduce el valor del ángulo entre la tensión y la corriente, para que el alumno visualice las ventajas que ello implica, es decir, se reduce la circulación de potencia reactiva por la línea y por ende se reducen la caída de tensión, las pérdidas de potencia activa, lo que reduce el consumo de combustibles y las pérdidas de potencia reactiva lo que mejora la operación de los generadores del SEP.

Comparando las corrientes de la Tabla 2 con las mostradas en la Figura 6-b), el estudiante es capaz de entender cuáles son las corrientes debidas a la carga de la línea y cuáles son las corrientes capacitivas.

4. Explicación de los resultados de las mediciones para los diferentes casos

Como ya se indicó, cada caso se explica por separado, en el orden de la tabla, pero relacionándolos entre sí. La tabla se va llenando según se hacen las explicaciones.

4.1. Línea con una carga que tiene un factor de potencia en atraso

La Figura 5 muestra que, a la derecha del modelo, hay tres bornes: de arriba hacia abajo, uno amarillo que representa una carga resistiva pura, un bombillo de 15W en este caso, otro verde, que es una carga inductiva modelada con una bobina y uno rojo, que es un condensador de 8 μ F. La Figura 5 muestra que, para lograr la carga con factor de potencia en atraso, $P + jQ$, se conectan en paralelo el bombillo (R) y la bobina (X).

Se energiza el modelo, conectándolo a la toma de 110V del aula y se comienza midiendo la tensión del envío que se supone constante para todos los casos (87V en este caso). Se aclara que es de 87V, relativamente bajo si se compara con los 110V ó 115V típicos para los tomacorrientes a 120V, porque el voltímetro, que mide hasta 150V tuvo que ser modificado para que no se dañara cuando se miden tensiones mayores que 150V. A continuación, se mide la tensión del recibo de la línea, 65V, y se les pide a los alumnos que calculen la caída de tensión en porcentaje mediante la Ecuación 1:

$$\% \Delta U_{e-R} = \left(\frac{U_e - U_R}{120} \right) 100 = \left(\frac{87 - 65}{120} \right) 100 = 18 \%. \quad (1)$$

En una línea de transmisión real, un 18% de caída de tensión es demasiado alto, pero como lo que se hace es establecer comparaciones entre ellas, se les explica a los alumnos que la caída de tensión es muy alta por las características del modelo. A continuación, se procede a medir los módulos de las corrientes: del envío, I_e , capacitiva del envío, I'_e , por la línea, I , capacitiva del recibo, I'_R y del recibo, I_R .

Si se ubican, en el diagrama fasorial de la Figura 9, los valores posibles, los alumnos pueden entender algo que teóricamente no comprenden muy bien: que las corrientes aumenten del envío al recibo como se mostró en el diagrama fasorial y ahora muestran las mediciones (véase la Figura 9).

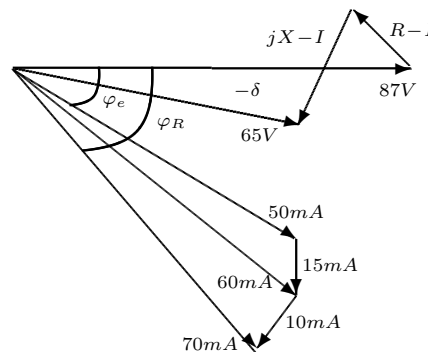


Figura 9: Diagrama fasorial de una línea de transmisión representada por su circuito Π con las mediciones numéricas realizadas.

A partir de los resultados de la primera fila de las Tablas 1 y 2 y de la Figura 9 se hacen las siguientes explicaciones:

1. La tensión del recibo es menor que la del envío debido a la caída en la resistencia y en la reactancia inductiva de la línea donde se evidencia que $X \gg R$, típico de las líneas de alta tensión, existiendo una caída de tensión del 18%.
2. La corriente capacitiva del envío es mayor que la del recibo porque la susceptancia capacitiva B' es única, pero la tensión del envío es mayor que la del recibo.
3. Las corrientes aumentan hacia el recibo debido al efecto de las corrientes capacitivas del envío y del recibo.
4. Las mediciones de las tensiones y las corrientes cumplen con la explicación teórica y con el diagrama fasorial, por ende, los estudiantes corroboran la teoría recibida.

4.2. Línea a la que se le mejora el factor de potencia de la carga

Con el objetivo de disminuir la circulación de la potencia reactiva por las líneas, la UNE penaliza las cargas industriales cuyo factor de potencia es menor que 0.9. Uno de los métodos más utilizados para aumentar el factor de potencia de las cargas es instalar condensadores conectados en paralelo con el recibo de la línea. Para lograr esto en el modelo activo de la línea Juraguá Camagüey, se conecta el borne rojo, que es un condensador, al recibo de la línea y se procede a realizar las mediciones de la segunda fila de las Tablas 1 y 2.

La Fila 2 de la Tabla 1 muestra que la tensión del recibo subió de 65V a 75V por lo que la caída de tensión bajó del 18 % al 10 % que es un valor alto, pero permisible en las líneas de transmisión. La Ecuación 2 y la Figura 10 muestran que, si la potencia reactiva entregada por los condensadores aumenta, el término $(Q_R - Q_C)$ disminuye y la caída de tensión disminuye como demostró el modelo.

$$\Delta U = \frac{P_r R + (Q_R - Q_C) X}{U_R} + j \frac{P_r X - (Q_R - Q_C) R}{U_R}. \quad (2)$$

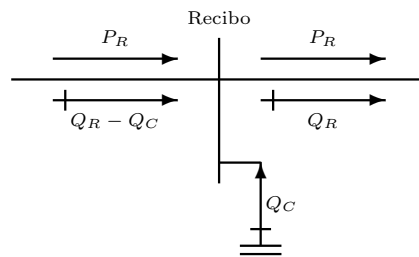


Figura 10: Efecto de la compensación de la potencia reactiva Q_C en la potencia reactiva del recibo de la línea.

La Fila 2 de la Tabla 2 muestra que, con la instalación de los condensadores en el recibo, las corrientes del envío, la que circula por la línea y la corriente del recibo disminuyeron en un 10.0 %, un 8.3 % y un 7.2 % respectivamente. La corriente capacitiva del recibo aumentó un 20 % porque la tensión del recibo aumentó en un 15.3 %. La disminución de estas corrientes mejora la eficiencia de la línea.

4.3. Línea en vacío. Efecto Ferranti

Por razones de operación, por fallas o durante las horas de mínima demanda, puede suceder que la línea esté transmitiendo potencias por debajo de su potencia natural que es la potencia del recibo de una línea que tiene conectada en el recibo su impedancia característica. En esos casos, la potencia reactiva neta de la línea se hace mayor que cero, la línea entrega potencia reactiva capacitiva al SEP a través de las redes de transmisión y la tensión del recibo de la línea puede subir a valores inadmisibles. Esta subida de tensión recibe el nombre de efecto Ferranti y es provocada por la susceptancia capacitiva del recibo de la línea (véase la Figura 6-b).

Utilizando el programa FLUCA (Llamo-Laborí, 2016) y con los datos de la Figura 11 se calculó la tensión del recibo para la línea Juraguá Camagüey en vacío siendo de $252.23 \angle -1.779^\circ kV$ cuando la del envío fue de $230.00 \angle 0^\circ kV$ para una subida de tensión del 9.66 %, permisible para los SEP de $220 kV$ donde la variación permisible de la tensión es del $\pm 10 \%$.

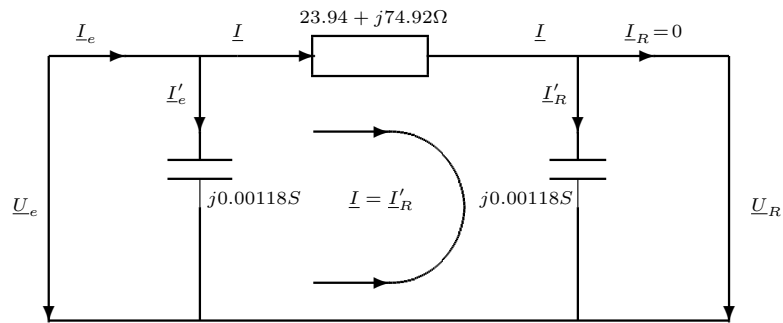


Figura 11: Línea Juraguá Camagüey sin carga en el recibo ($I_R = 0$).

Con esos resultados y aplicando las leyes de Kirchoff en el circuito de la Figura 11, se calcularon las corrientes:

- Por la línea: $I = 169.739 \angle 88.86^\circ A$
- Capacitiva del envío: $156.693 \angle 90^\circ A$ y
- Del envío: $I_e = I'_e + I = 326.415 \angle 89.40^\circ A$

Las cuales se muestran en el diagrama fasorial de la Figura 12.

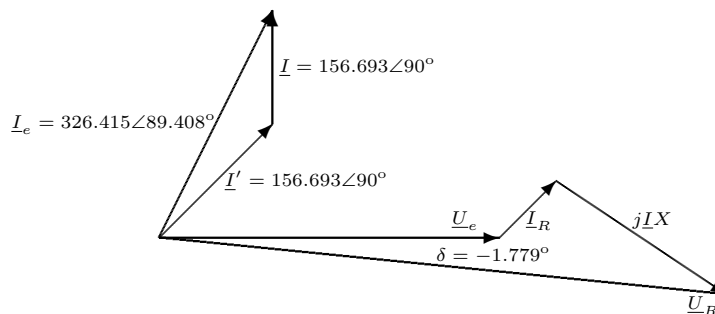


Figura 12: Diagrama fasorial de la línea Juraguá Camagüey en vacío.

La Fila 3 de la Tabla 1 muestra que, en el modelo, la subida de tensión es del 23%, mucho mayor que la real, pero el estudiante se da cuenta de que, realmente, la caída de tensión pasa a una subida de tensión cuando la línea se queda sin carga. Otros aspectos del efecto Ferranti que se aclaran con el modelo son:

1. Que la subida de tensión se debe a la susceptancia capacitiva del recibo, lo que se demuestra desconectándola y mostrando que la tensión del recibo se hace igual a la del envío. Con la susceptancia del recibo conectada, se desconecta la del envío y se muestra que la tensión del recibo no cambia.
2. La Fila 3 de la Tabla 2 muestra que la corriente por la línea (I) es ahora igual a la corriente capacitiva del recibo (I'_R) y que las relaciones entre las corrientes del modelo son parecidas a las reales.

4.4. Línea en vacío compensada

La subida de tensión provocada por el efecto Ferranti se disminuye compensando la potencia reactiva que inyecta la capacitancia de la línea mediante la instalación de una inductancia conectada en paralelo con la capacitancia del recibo (Figura 13). En ese caso, la potencia reactiva que circula por la línea hacia el envío disminuye en un valor Q_L , el efecto Ferranti disminuye, lográndose subidas de tensión permisibles.

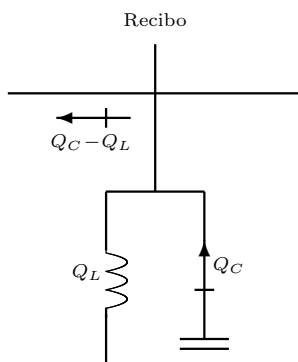


Figura 13: Conexión en el recibo de una reactancia inductiva de susceptancia $-jBL$ que inyecta una potencia reactiva Q_L para atenuar la subida de tensión provocada por la susceptancia capacitiva del recibo de la línea $jB'/2$.

La Fila 4 de la Tabla 1 muestra que la caída de tensión, debido a la instalación de una susceptancia inductiva en paralelo con el recibo, pasó de una subida del 23 % a una caída del 14 % por lo que se explica a los estudiantes que el valor de la potencia reactiva instalada fue demasiado alto y llevó la caída de tensión a un valor no permisible.

La Fila 4 de la Tabla 2 muestra que la corriente capacitiva del recibo disminuyó un 15.4 % porque la tensión del recibo disminuyó un 39.2 %. El resto de las corrientes aumentaron debido a la compensación: un 20.00 % la del envío, un 92.30 % la corriente por la línea y la del recibo pasó de 0.0 a 12.00mA.

Los resultados de este modelo mostraron a los estudiantes qué es el efecto Ferranti, cuáles son y cómo se reducen sus efectos.

4.5. Línea representada mediante un circuito simple impedancia

Cuando en una línea de transmisión la potencia reactiva capacitiva que ‘genera’ la línea es despreciable frente a la que consume la carga, según la Ecuación 3 puede despreciarse la capacitancia de la línea (B'_1) y surge el circuito Simple Impedancia que es típico de las líneas a tensiones de 34.5kV y menores (Figura 14):

$$Q_{\text{Gen}} \cong U_{\text{Nom}}^2 B'_1 < \frac{Q_{\text{Carga}}}{10}. \quad (3)$$

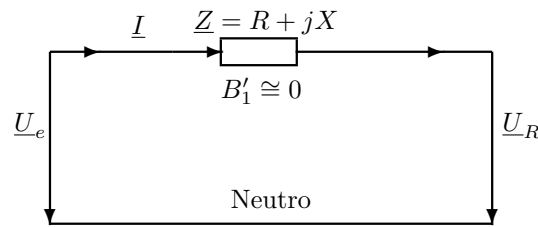


Figura 14: Circuito simple impedancia para las líneas cortas.

Modelar un circuito Simple Impedancia es muy sencillo: solo hay que desconectar los condensadores del envío y el recibo de la línea, lo que es muy fácil pues solo hay que abrir el enlace que permite medir las corrientes capacitivas de las dos cabezas de la línea.

Para establecer una comparación adecuada del circuito simple impedancia con el circuito Π Equivalente, se conectó la misma carga que en el primer caso modelado, bornes amarillo y verde conectados al recibo de la línea.

La Fila 5 de la Tabla 1 muestra que la tensión del recibo es la menor ($60V$) y por ende la caída de tensión es la mayor (22.00%). La razón es obvia: al no estar el condensador del recibo, la potencia reactiva que circula por la línea es mayor que en el primer caso, la corriente por la línea es mayor, ($75A > 60A$) y la caída de tensión es mayor.

La Fila 5 de la Tabla 2 muestra que las corrientes del envío, por la línea y del recibo, son iguales a $75A$ debido a que no hay ramas en paralelo en el circuito Simple Impedancia.

Se enfatiza a los alumnos que estos resultados muestran la necesidad de escoger adecuadamente el modelo que representará las LTEE para no incurrir en errores en los resultados de los cálculos de flujos de cargas, cortocircuitos y cualquier otro tipo de análisis en los SEP.

5. Conclusiones






El presente trabajo tuvo como objetivo principal determinar la posibilidad y conveniencia de implementar la metodología de utilizar la maqueta interactiva modelando el comportamiento de las líneas de transmisión de energía eléctrica.

Si se modelan de forma activa los fenómenos que muestran cómo influye el factor de potencia de la carga en la caída de tensión y cuál es el comportamiento de las LTEE para diferentes estados de la carga y para diferentes valores de potencia reactiva capacitiva instalada, se logra una mejor comprensión de los mismos y se motiva a los estudiantes para que no vean dichos temas como algo absolutamente teórico. También se logra algo que se ejercita poco en la carrera: la utilización de instrumentos de medición y la interpretación de los resultados alcanzados en dichas mediciones.

Este modelo se utiliza desde el curso 1999–2000 por lo que, si se supone de forma conservadora una matrícula promedio anual de sesenta estudiantes en el cuarto año de la carrera de Ingeniería Eléctrica, se han beneficiado unos mil veinte estudiantes con estas demostraciones prácticas de los aspectos teóricos explicados.

Referencias

-  Arévalo, E. N., and Pulido, J. M. (2016).
Docencia presencial y laboratorio remoto: una unión idónea para las prácticas de motores alternativos.
Modelling in Science Education and Learning, 9(1).
[doi:https://doi.org/10.4995/mse1.2016.4584](https://doi.org/10.4995/mse1.2016.4584)
-  Bravo, G. L., and Cáceres, M. M. (2000).
El proceso de enseñanza aprendizaje desde una perspectiva comunicativa.
Revista Iberoamericana de Educación.
[doi:https://doi.org/10.35362/rie3872607](https://doi.org/10.35362/rie3872607)
-  Campos, V. P., and Moya, R. R. (2011).
La formación profesional desde una concepción personalizada del proceso de aprendizaje.
Cuadernos de Educación y Desarrollo.
<http://www.eumed.net/rev/ced/index.htm>
-  Capote, G. E., Rizo, N. R., and Bravo, G. L. (2016).
La formación de ingenieros en la actualidad. Una explicación necesaria.
Revista Universidad y Sociedad, 21–28.
<http://rus.ucf.edu.cu/>
-  Carlos Roldán-Blay, M. P.-S. (2017).
Laboratorio virtual como herramienta para comprender el funcionamiento de las líneas de alta tensión.
Modelling in Science Education and Learning , 10(2).
[doi:https://doi.org/10.4995/mse1.2017.5902](https://doi.org/10.4995/mse1.2017.5902)
-  Fandiño, E. A., and Márquez, M. E. (2017).
Apuntes para una historia del Centro de Investigaciones y pruebas electroenergéticas.
<ftp://ftp.electrica.cujae.edu.cu>.
-  Lázaro, M., Rodríguez, J. B., and Olivas, G. G. (2018).
Laboratorio virtual para la interpretación de las cargas en vuelo.
Modelling in Science Education and Learning , 11(2).
[doi:https://doi.org/10.4995/mse1.2018.9302](https://doi.org/10.4995/mse1.2018.9302)
-  Llamo, H. S. (2015).
Apuntes para un libro de texto para la carrera de Ingeniería Eléctrica, Sistemas Eléctricos I.
La Habana, Cuba.
<ftp://ftp.electrica.cujae.edu.cu/Clases/CRD/4to/Sistema/Sistema%20I/18%2019%20%20Alumnos%20Sist%20El%C3%A9ct%20I/Alumnos%20Sist%20El%20I%20Lab%20y%202%2018%2019/>

-  [Llamo, H. S. \(2016\).](#)
Paquete de programas PARLINC. Opción 'Calcular parámetros Z/Y de las Líneas de Transmisión', versión XVIII. 07/2016
 La Habana, Cuba.
<ftp://ftp.electrica.cujae.edu.cu/Clases/CRD/4to/Sistema/Sistema%20I/18%2019%20%20Alumnos%20Sist%20E1%C3%A9ct%20I/Alumnos%20Sist%20E1%20I%20Lab%203%20y%204%2018%2019/>
-  [Llamo, H. S. \(2016\).](#)
Programa docente FLUCA (calcula flujos de cargas en SEP complejos utilizando el método de Gauss Seydel).
 La Habana, Cuba.
<ftp://ftp.electrica.cujae.edu.cu/Clases/CRD/4to/Sistema/Sistema%20I/18%2019%20%20Alumnos%20Sist%20E1%C3%A9ct%20I/Alumnos%20Sist%20E1%20I%20Lab%203%20y%204%2018%2019/>
-  [MES \(2009\).](#)
Plan de Estudio D. Modelo del profesional.
 Ministerio de Educación Superior. Cuba
-  [Páez, V. S. \(2017\).](#)
La Didáctica de la Educación Superior y la formación profesional ante los retos del siglo XXI.
 La Habana.
https://www.researchgate.net/publication/333488802-La_Didactica_de_la_Educacion_Superior_y_la_formacion_profesional_ante_los_retos_del_siglo_XXI?enrichId=rgreq-98602b1beca74b45bb228484d844965f-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWd10zMzMzQ4ODgwMjtBUzo3NjQzNDM1MjQyN
-  [Sirur, J. F., and Benegas, J. \(2008\).](#)
Aprendizaje de circuitos eléctricos en el nivel polimodal: resultados de distintas aproximaciones didácticas.
 Enseñanza de la ciencias, 26(2), 245–256.
<https://core.ac.uk/download/pdf/38992152.pdf>