

# Trabajo Fin de Grado

Equipo Demostrativo del Transporte de Energía  
Eléctrica en Alta Tensión

Autor

**Manel Pérez Lázaro**

Director

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2016/2017

# Equipo demostrativo del transporte de energía eléctrica en alta tensión

## RESUMEN

En este trabajo de fin de grado (TFG) se han hecho modificaciones en una maqueta ya existente de un sistema de transporte de energía eléctrica compuesto por dos torres de alta tensión para una línea aérea, dos bancos de tres transformadores monofásicos para elevar/reducir la tensión de la línea, un consumidor final como representación de los usuarios de energía eléctrica y una planta generadora de energía eléctrica.

El propósito ha sido mejorar el realismo de la maqueta, así como hacerla más funcional y manejable. Se explican en este documento los rangos de tensión a los cuales puede funcionar la maqueta y las diferentes formas de conexión de los bancos de transformadores.

En la memoria se relata al detalle cada una de las mejoras que se han llevado a cabo, así como problemas e inconvenientes a la hora de realizarlos.

También se ha hecho una breve introducción histórica de la electricidad y su transporte, así como un breve análisis de los componentes que forman la maqueta.

Se explican las razones de que el transporte de energía eléctrica sea en alta tensión acompañado de fórmulas que refuerzan y aclaran los argumentos que se exponen.

Finalmente, en el mismo documento pero ya como anexo, se ha creado un documento de manual de usuario donde se explican las conexiones que se deben realizar, el orden a seguir al hacerlo, la lista de materiales que se emplean, los riesgos y advertencias necesarios para su correcto uso. Este manual debe facilitar su uso a otra persona con conocimientos básicos de electricidad, ya sea con fines divulgativos o docentes.

Como complemento divulgativo, se ha realizado un video explicando brevemente cada parte de la maqueta y su funcionamiento.

# Lecture demonstration of a high voltage overhead power line.

## ABSTRACT

In this final-study project (TFG), modifications have been made to an existing model of an electric energy transport system composed of two high voltage towers for an overhead electric transport line, two banks of three single-phase transformers to increase / reduce line voltage, and an end consumer as a representation of electric power users and an electric power generating plant.

The purpose has been to improve the realism of the model, as well as to make it more functional and manageable. This explains the voltage ranges at which the model can work and the different ways of connecting the transformer banks.

The report details each of the improvements that have been made, as well as problems and drawbacks when making them.

There has also been a brief historical introduction of electricity and its transportation, as well as a brief analysis of the components that make up the model.

Moreover, it explains the reasons why the transport of electric energy is in high voltage accompanied by formulas that reinforce and clarify the arguments that are exposed.

Finally, in the same document but already as an attachment, an user manual document has been generated, which explains the connections to be made, the order to be followed, the list of materials used, the risks and warnings required for its correct use. This manual should facilitate its use for informational and educational purposes to someone with a basic knowledge of electricity.

As a divulgation activity, a video has been made in order to explain briefly each part of the model and its proper operation.



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. MANEL PÉREZ LÁZARO

con nº de DNI 72999700T en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
GRADO, (Título del Trabajo)

EQUIPO DEMOSTRATIVO DEL TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ALTA

TENSIÓN

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 03/02/2017

Fdo: MANEL PÉREZ LÁZARO



## INDICE

1.	ANTECEDENTES .....	1
2.	OBJETIVOS .....	2
3.	FUNDAMENTOS ELECTROTÉCNICOS .....	2
3.1	EL GENERADOR ELÉCTRICO .....	3
3.2	EL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO .....	4
3.3	CONDUCTORES AÉREOS DESNUDOS.....	8
4.	TRANSPORTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	10
4.1	EFEECTO JOULE .....	12
4.2	RENDIMIENTO .....	12
5.	DESCRIPCIÓN MAQUETA ORIGINAL.....	14
6.	INTERVENCIONES SOBRE LA MAQUETA ORIGINAL.....	16
6.1	TORRES .....	16
6.2	AISLADORES.....	16
6.3	BASES.....	17
6.4	TRANSFORMADORES.....	18
6.5	CONSUMIDOR FINAL .....	18
6.6	CONDUCTORES.....	19
6.7	ALIMENTACIÓN A LAS FAROLAS.....	20
6.8	GENERADOR (FUENTES DE ALIMENTACIÓN) .....	21
6.9	BANANAS DE SEGURIDAD .....	23
7.	CONCLUSIONES .....	23
7.1	PROBLEMAS EN LA REALIZACIÓN Y POSIBLES MEJORAS .....	23
8.	AGRADECIMIENTOS.....	25
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	25
9.1	PROCEDENCIA DE LAS IMÁGENES.....	26
ANEXO .....		1
MANUAL DE USUARIO.....		3
1.	RIESGOS Y ADVERTENCIAS .....	3
2.	COMPONENTES DE LA MAQUETA.....	4
3.	DIAGRAMA DE BLOQUES.....	6
4.	FUNCIONAMIENTO DEL EXPERIMENTO .....	7
5.	CONEXIONADO DE LOS TRANSFORMADORES Y LAS TORRES .....	9

## 1. ANTECEDENTES

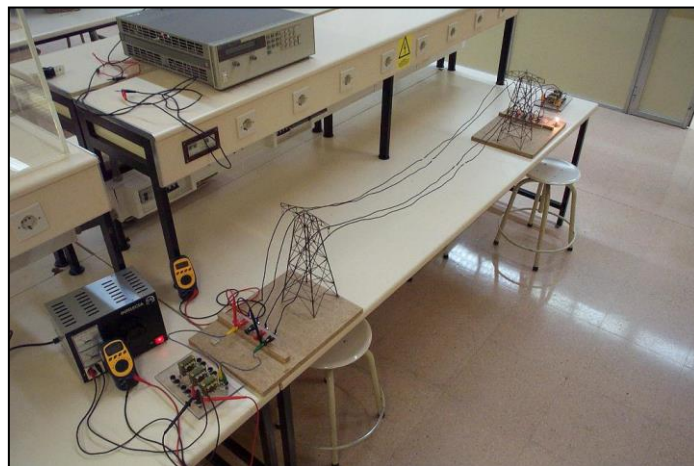
Partiré de un trabajo previo realizado dentro de las actividades de innovación docente del Edemuz (Equipo Docente de Electromagnetismo de la Universidad de Zaragoza). [1]

Este consiste en una maqueta, a escala 1:100 aproximadamente, de un sistema de transporte de energía eléctrica, cuya finalidad es mejorar la comprensión de los principios básicos del transporte y distribución de la energía eléctrica. Está dirigida tanto a estudiantes de ingeniería y ciclos técnicos formativos como a aquellas personas, sean estudiantes o público en general, que no tengan ninguna formación previa en materia de electricidad.

La maqueta original fue construida por los alumnos Rubén Méndez Santías, Jorge Mayor y Cristian Martínez Martín. Se observaron algunos defectos en su planteamiento y ejecución, que la hacían incómoda de emplear:

- Su transporte de un lugar a otro era muy difícil al no poder desconectarse los cables de las torres. Estos cables de acero eran, además, muy gruesos y pesados.
- No podía embalsarse fácilmente debido al tamaño del conjunto y la fragilidad de las torres.
- Se planteaba como dos líneas monofásicas en vez de una trifásica.
- No cumplía la normativa referente a tensiones de seguridad.

En la Fig. 1.1 se puede observar la maqueta original



**Fig. 1.1.** Imagen de la maqueta original en el laboratorio de Electricidad del departamento de Ingeniería Eléctrica (E.I.N.A.). [1]

## **2. OBJETIVOS**

Este trabajo tiene como finalidad mejorar una maqueta de un sistema de transporte de energía eléctrica con fines divulgativos y de docencia, que pueda emplearse en actividades docentes y divulgativas del departamento de Ingeniería Eléctrica y de la comunidad educativa en general.

Para ello se ha adecuado el conjunto previo para facilitar eficientemente su transporte y embalaje, se ha procedido al embellecimiento de algunas de las partes que componen la maqueta y mejorado su funcionamiento eléctrico, transformándola en una línea trifásica.

La maqueta debía también cumplir la normativa relativa a la seguridad eléctrica. En el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, ITC-BT 36, se establece que la tensión de seguridad no puede superar los 50 V en corriente alterna. La fuente de alimentación (o modelo de la parte de la generación de energía eléctrica) a la entrada del transformador elevador de tensión se adaptará de manera que su tensión máxima sea de 5 V, valor máximo que permiten los transformadores con las conexiones adoptadas y que hacen que la tensión máxima entre los conductores de la línea no supere los 50 V.

Al ser uno de sus objetivos el de la divulgación, este trabajo se complementa con material audiovisual. Este consiste en un vídeo explicando su funcionamiento, que se ha incluido en el canal que el Edemuz tiene en YouTube. [2]

Todos los materiales generados en este trabajo pasarán a formar parte del conjunto de materiales didácticos y divulgativos que se ofrecen a la comunidad educativa desde la Universidad de Zaragoza.

## **3. FUNDAMENTOS ELECTROTÉCNICOS**

Para entender el funcionamiento de la electricidad en la época actual, hay que recordar cómo ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. Para ello, se explica brevemente los avances más significativos de la historia de la electricidad.

Se tienen registros de aplicaciones eléctricas y/o magnéticas de hace mucho tiempo, pero el tratamiento científico sistemático no empezó hasta el siglo XVIII.

Hubo aportaciones e investigaciones sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos durante la primera mitad del siglo XIX, pero no se hallaría la comprensión total de la electricidad y el magnetismo hasta la unificación de ambos fenómenos que describen las ecuaciones de Maxwell (1861-1865).

A partir del último cuarto del siglo XIX será cuando la electricidad se convierte en uno de los motores fundamentales de la segunda revolución industrial. Fue el momento de grandes ingenieros como Nicola Tesla, George Westinghouse, Alexander Graham Bell y sobre todo Thomas Alva Edison, el cual entendió la relación entre la investigación científico-técnica y el mercado capitalista.

Los descubrimientos más conocidos y destacados son la corriente alterna por Tesla y Westinghouse, el teléfono por Graham Bell y la bombilla incandescente por Edison. Éste último, gracias a su visión comercial, fundó el laboratorio Menlo Park donde gracias a sus colaboradores consiguió un gran número de patentes en inventos cuyo desarrollo y mejora posterior han tenido gran importancia en la tecnología actual.

Primero para el alumbrado y luego para aplicaciones industriales y de comunicación, la tecnología eléctrica supuso no sólo un avance técnico, sino también un importante cambio social.

En la actualidad se sigue investigando, innovando y mejorando en este tema. Por ejemplo, el transporte de energía al inicio era impensable para largas distancias, así que las centrales debían estar cerca de los usuarios. Con la mejora de materiales e investigaciones, ahora se puede elevar la tensión hasta niveles de los millones de voltios (MV), mejorando el rendimiento de transporte y permitiendo grandes distancias para el mismo. [3]

Los componentes básicos de una red de, transporte y distribución de energía eléctrica se describen brevemente a continuación.

### 3.1 EL GENERADOR ELÉCTRICO

Todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos puntos, llamados terminales o bornes, transformando energía en energía eléctrica, se considera un generador eléctrico.

En los generadores rotativos y según la ley de Faraday (1),

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

esta transformación se consigue por la variación temporal del flujo de campo magnético ( $\Phi_B$ ) sobre las espiras o bobinas del estator (o armadura). Al producirse un movimiento mecánico relativo entre el campo magnético y las espiras conductoras del estator, generamos una fuerza electromotriz, fem,  $\varepsilon$ .

La fem es igual a la diferencia de potencial en los terminales del generador en ausencia de carga; al conectar la carga se produce una caída de tensión al circular la corriente eléctrica por los conductores del estator, siendo mayor el valor de la fem al de la diferencia potencial que puede medirse entre los terminales de la carga.

Aunque lo más común y utilizado es la transformación de energía mecánica para obtener energía eléctrica, también hay otros tipos de generadores que transforman en energía eléctrica otras diferentes, por ejemplo energía química, radiación electromagnética, energía térmica y energía nuclear.

Además de motor y generador, algunos generadores eléctricos suelen incluir suministro de combustible, regulador de velocidad del motor, regulador de tensión del generador, sistemas de refrigeración y escape, sistemas de lubricación, etc.



Los generadores eléctricos de reserva, empleados como sistemas de seguridad en hospitales, servidores informáticos, aeropuertos, etc. suelen tener un sistema automático de arranque, y un interruptor de transferencia de la carga al generador si falla la alimentación procedente de la red. [4]

### 3.2 EL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO

El transformador es una máquina eléctrica estática capaz de aumentar o reducir la tensión de un sistema eléctrico de corriente alterna. Consiste básicamente en dos bobinas acopladas magnéticamente (primario y secundario) mediante un núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidad (Fig. 3.1 y Fig. 3.2).

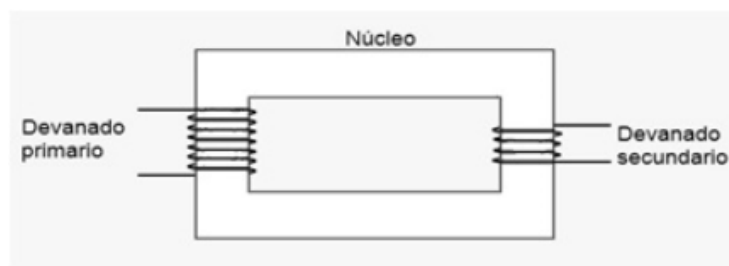


Fig. 3.1. Componentes básicos de un transformador monofásico. [2]

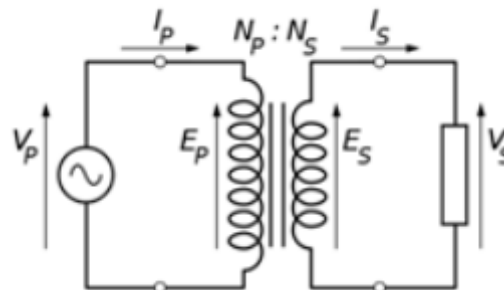


Fig. 3.2. Esquema básico de funcionamiento de un transformador monofásico ideal. [3]

Al aplicar una fuerza electromotriz en el devanado primario, la corriente eléctrica que lo atraviesa genera un flujo magnético variable en el tiempo en el núcleo de hierro.

Al estar los dos devanados arrollados al núcleo, este flujo genera una fuerza electromotriz en el devanado secundario. La relación de transformación,  $m$ , es el cociente entre la tensión de la bobina primaria y la secundaria. Es proporcional al número de espiras de cada devanado. Variando el número de vueltas variaremos la relación entre la tensión de entrada y de salida.

Por ejemplo si el devanado secundario tiene el doble de espiras, la tensión en la salida será el doble que a la entrada (2).

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = m \quad (2)$$

Siendo  $N$  el número de espiras,  $V$  la tensión e  $I$  la intensidad de la corriente eléctrica, y los subíndices  $p$  se refiere al primario y  $s$  al secundario del transformador.

Al aumentar o disminuir la tensión a la salida, ocurre lo mismo pero inversamente con la intensidad de corriente: si aumentamos la tensión a la salida disminuimos la corriente que circula por el devanado secundario, y viceversa. Por eso tiene tanta importancia el transformador para el transporte de la energía eléctrica ya que permite elevar la tensión, disminuir la corriente y así minimizar pérdidas por efecto Joule, y luego volver a reducir tensión, aumentando de nuevo la corriente, para el consumo. [5] [6]

Los circuitos equivalentes de un transformador monofásico se muestran en la Fig. 3.3 y 3.4:

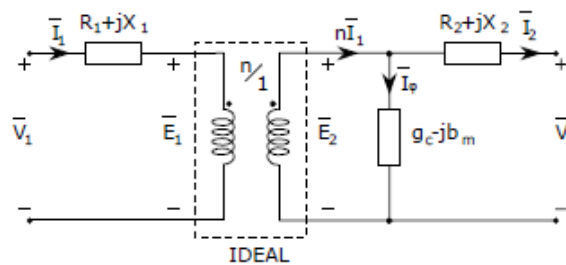


Fig. 3.3. Circuito equivalente exacto del transformador. [4]

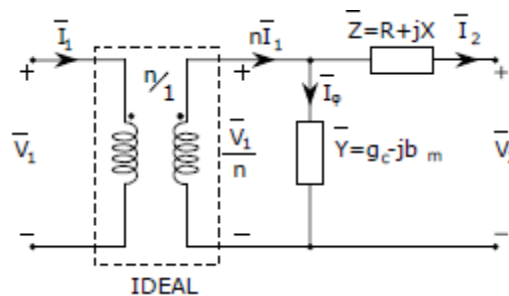


Fig. 3.4. Circuito equivalente aproximado del transformador. [4]

Se usan transformadores elevadores y reductores en la maqueta a la entrada y la salida de las torres de alta tensión para representar el funcionamiento real del sistema de transporte eléctrico. En las Fig. 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran los circuitos equivalentes de un transformador monofásico, o el equivalente monofásico de uno trifásico. [7]

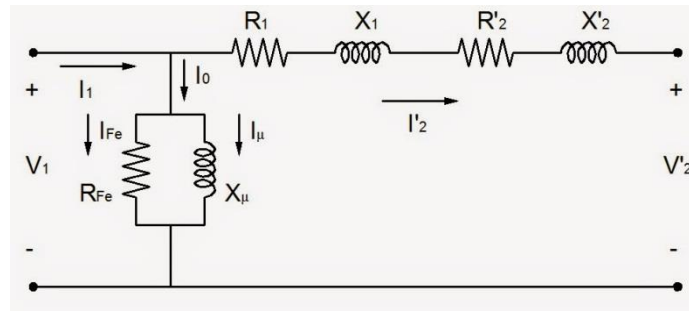


Fig. 3.5. Circuito equivalente aproximado reducido al primario. [5]

$R_1$ ,  $R'_2$ ,  $X_1$  y  $X'_2$  representan las resistencias equivalentes de los devanados y las reactancias equivalentes del flujo de dispersión.

La  $R_{Fe}$  y la  $X_\mu$  representan las pérdidas que se producen en el hierro y la susceptancia magnetizante respectivamente.

En la maqueta se utilizan tres transformadores monofásicos para formar un banco de transformadores, el cual utilizaremos en nuestro sistema trifásico. Cada uno de los transformadores monofásicos que forman el banco, tiene teóricamente una relación de transformación simple,  $m_s$ , de 14,1. Este resultado se obtiene relacionando las tensiones de primario y secundario de cada uno de los transformadores (2):

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{127 \text{ V}}{9 \text{ V}} = 14,1$$

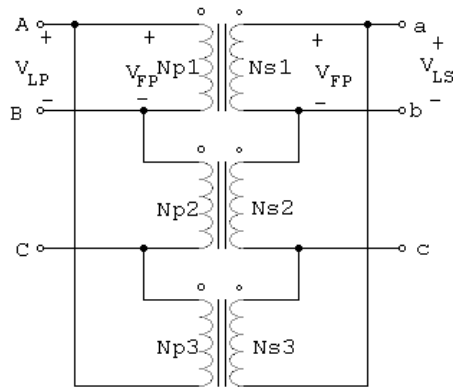
Al comprobar esta relación de transformación en el laboratorio, se obtuvieron los resultados incluidos en la Tabla 3.1.

Transformador 1		Transformador 2		Transformador 2	
Entrada 9 V	Salida 127 V	Entrada 9 V	Salida 127 V	Entrada 9 V	Salida 127 V
3 V	32.2 V	3 V	32,3 V	3 V	32 V
6 V	62,37 V	6 V	62,3 V	6 V	62,3 V
9 V	94 V	9 V	93,1 V	9 V	93,22 V

Tabla 3.1. Comprobación experimental de la relación de transformación de los transformadores.

De los datos de la Tabla 3.1 obtenemos la verdadera relación de transformación simple,  $m_s$ , que es aproximadamente de 10.

Utilizaremos conexiones triángulo-triángulo (Fig. 3.6) en ambos bancos de transformadores para mantener la relación de transformación simple. El generador suministra una tensión que, según las pruebas, tiene un valor entre 3,7 y 4,7 V. Este margen de valores se debe a variaciones en la velocidad de giro del motor universal que incluye el taladro empleado como elemento de tracción mecánica del generador, cuando se conecta directamente a la red de CA de 230 V.



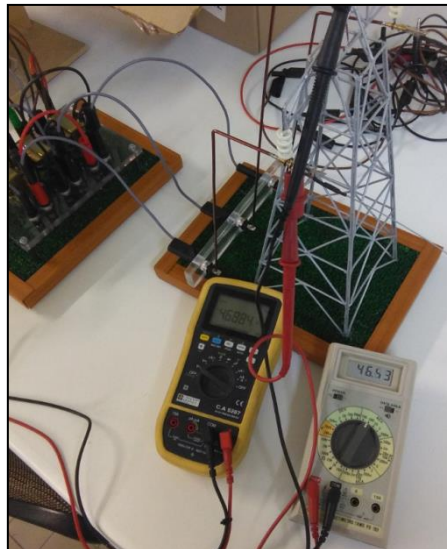
**Fig. 3.6.** Esquema de conexión de transformadores triángulo-triángulo. [6]

Con esta conexión, el valor de la tensión entre las fases de la línea aérea no supera los 50 V.

La tensión máxima que se puede obtener se calcula (3):

$$V_{salida} = V_{m\acute{a}x. entrada} * 10 = 4,7 * 10 = 47 V \quad (3)$$

En la Fig. 3.7 se observan los valores de los polímetros durante una de las pruebas:



**Fig. 3.7.** Medidas de los voltímetros RMS durante el estudio de la maqueta en el laboratorio.

Para que se comprendan todas las posibilidades que ofrece la maqueta con fines divulgativos y docentes, voy a explicar brevemente otras posibles conexiones y sus características.

Si utilizásemos conexiones de triángulo-estrella (Fig. 3.8) en el transformador de entrada a la línea, la relación de transformación compuesta es  $\sqrt{3}$  la simple, por tanto aumentamos la

relación de transformación de la tensión y nos permite obtener una tensión más elevada entre las fases de la línea aérea.

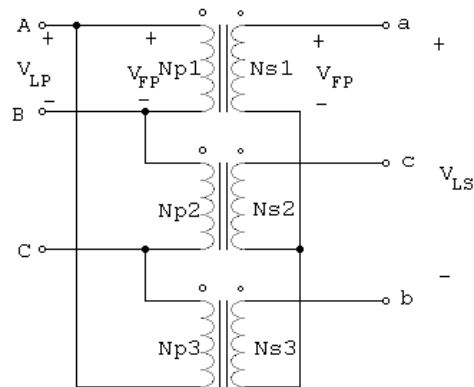


Fig. 3.8. Esquema de conexión de transformadores triángulo-estrella. [6]

Mediante una conexión estrella-triángulo (Fig. 3.9) en el transformador de entrada a la línea, la relación de transformación compuesta es  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  la simple, por tanto disminuimos la relación de transformación de la tensión y nos permite suministrar una tensión más elevada a la entrada sin superar la tensión de seguridad entre las fases de la línea aérea.

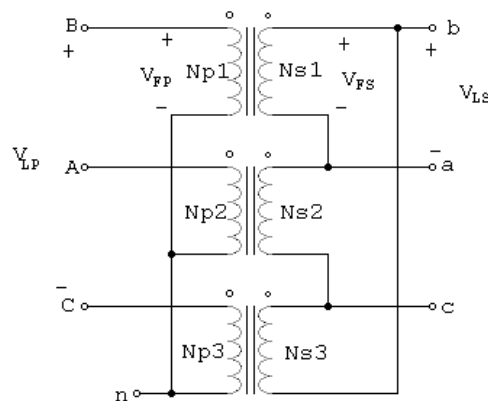


Fig. 3.9. Esquema de conexión de transformadores estrella-triángulo. [6]

### 3.3 CONDUCTORES AÉREOS DESNUDOS

La conexión eléctrica entre los transformadores elevadores y reductores se realiza generalmente mediante conductores aéreos desnudos de aluminio y núcleo de acero. Estos conductores forman lo que se conoce como línea eléctrica. Su modelo electrotécnico varía según la longitud de los conductores; generalmente se emplean tres modelos diferentes:

- Líneas de larga distancia
- Líneas de media distancia (modelos en PI o en T)
- Línea corta (se desprecia la rama de vacío)

Cada una se utiliza en las siguientes situaciones:

- Línea corta cuando la longitud de la línea es menor de 80 km o cuando se realiza un estudio previo de la línea. Se desprecia la capacidad y la conductancia de aislamiento y efecto corona; se pueden suponer los parámetros circuitales concentrados en un punto de la línea.

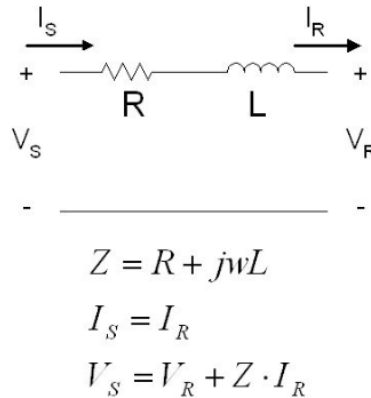
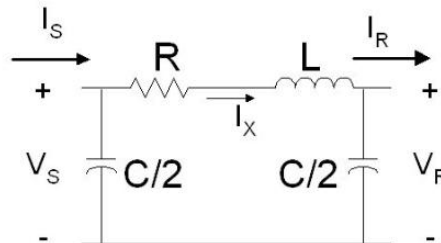


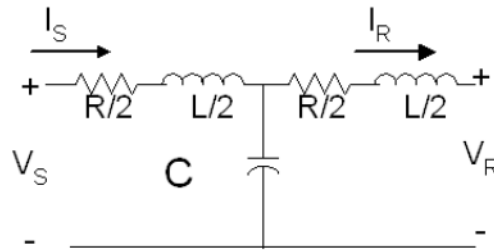
Fig. 3.10. Esquema eléctrico de una línea de longitud corta. [7]

- Líneas de media distancia (modelos en T y en  $\pi$ ) cuando la longitud está entre 80 y 240 km. No podemos despreciar la capacidad de la línea, pero si la conductancia.



## Modelo $\pi$

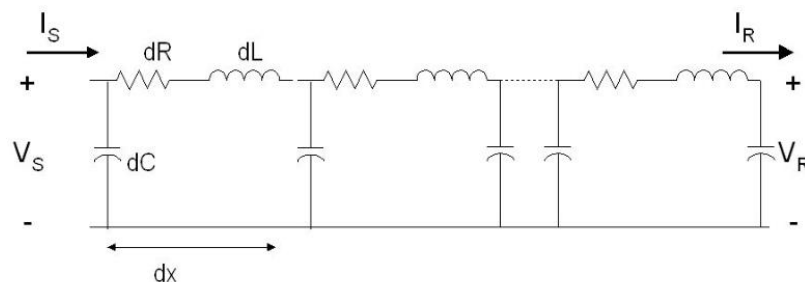
Fig. 3.11. Esquema eléctrico de una línea de media distancia, modelo en  $\pi$ . [7]



## Modelo T

Fig. 3.12. Esquema eléctrico de una línea de media distancia, modelo en T. [7]

- Línea larga cuando la longitud es mayor de 240 km. En este caso los parámetros de la línea no podemos suponerlos en un mismo punto de la misma, sino que utilizamos ecuaciones diferenciales en lugar de los circuitos equivalentes [8] [9]. En la Fig. 3.13 se muestra el modelo, donde se desprecian los efectos de la conductancia, que estarían representados por una resistencia en paralelo con el condensador.



Se visualiza como un número infinito de diferenciales de circuitos  $\pi$  de longitud  $dx$

Fig. 3.13. Esquema eléctrico de una línea de larga distancia. [7]

#### 4. TRANSPORTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Uno de los mayores problemas de la electricidad es su dificultad de almacenarla de forma eficiente. Por tanto tenemos que generarla y distribuirla constantemente según la demanda energética existente en cada momento.

La energía eléctrica se puede almacenar mediante baterías convencionales de Pb-ácido, baterías de ultracondensadores, estaciones de bombeo, volantes de inercia (flywheels), depósitos de hidrógeno, o con energía magnética por superconducción. Debido al alto consumo de energía en la actualidad, estas formas de almacenamiento no son capaces de satisfacer los picos en la demanda de energía. Es necesario, por lo tanto, mejorar continuamente el transporte para abaratar costes y conseguir la máxima eficiencia posible.

Todas las mejoras que reduzcan las pérdidas de potencia mientras se transporta son un gran beneficio.

¿Por qué la energía se transporta en alta tensión?

El transporte se realiza a alta tensión porque reduce las pérdidas de potencia entre la generación y el consumidor, lo cual reduce el coste económico. Los materiales utilizados también tienen mucha importancia, ya que la mejora del aislamiento entre conductores, soportes, etc. Permiten aumentar el voltaje al cual podemos realizar el transporte.

La causa de una mejor eficiencia al utilizar altas tensiones de transporte es la reducción de las pérdidas por efecto Joule, producidas por la corriente eléctrica al circular por el conductor. Los cables generan una resistencia contra el paso de la corriente, y esta resistencia se convierte en calor y pérdida de energía.

Con la misma potencia transportada, al elevar la tensión entre los conductores de la línea conseguimos reducir de manera muy significativa la corriente que circula por los conductores. Esto proporciona beneficios:

- Menores pérdidas por efecto Joule
- Menor sección de los conductores al reducir la corriente que circula por ellos, lo cual proporciona un gran beneficio económico ya que los cables son aproximadamente el 30% de la inversión inicial de una instalación de transporte.
- Al disminuir la masa de los conductores, los apoyos de éstos no tienen que soportar tanto peso y pueden diseñarse menos robustos, lo cual reduce el coste de las estructuras y sujeciones [9].

Actualmente los sistemas de transmisión de energía eléctrica en muy alta tensión son de 500, 750 y 1200 kV en corriente alterna y  $\pm 500$ , 550, 600 y 800 kV de continua.

En la siguiente gráfica se puede observar la evolución de la tensión de línea empleada en las líneas de transporte de la energía eléctrica en el siglo pasado:

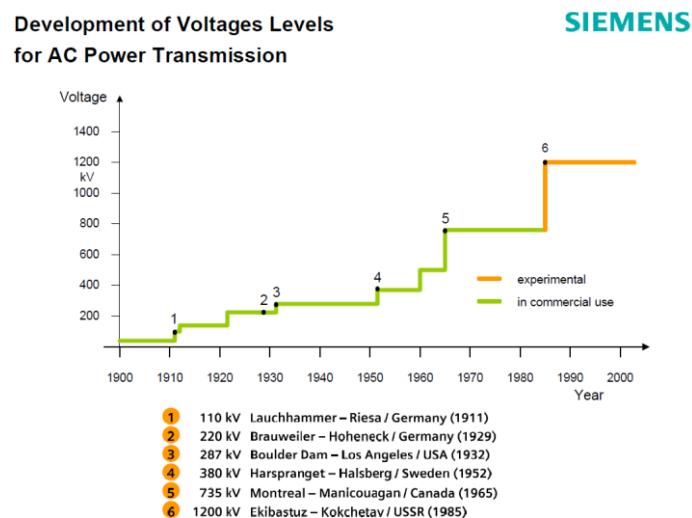


Fig. 4.1. Gráfica de la evolución de la tensión de transporte en el siglo XX. [8]



El límite de esta progresión se encuentra en el fenómeno de ruptura dieléctrica y los efectos de conducción indeseada relacionada con ellos (ruptura dieléctrica). Los campos eléctricos en el entorno del aire que rodea a los conductores y en los materiales dieléctricos que rodean los elementos de una red de transporte aumentan al hacerlo la tensión aplicada. Cuando la intensidad del campo eléctrico  $E$  supera un cierto valor (3 MV/m en el caso del aire) comienzan a producirse los fenómenos de ruptura dieléctrica (efecto corona, descargas parciales) que dan lugar a pérdidas adicionales a las del efecto Joule y que, cuando la tensión se eleva en exceso, dan lugar a cortocircuitos entre fases o entre fases y tierra.

En la actualidad, las mejoras tecnológicas permiten seguir desarrollando materiales para un transporte de energía eléctrica más eficiente al igual que ha sucedido en el siglo XX. [10]

#### 4.1 EFECTO JOULE

Cuando circula una corriente eléctrica por un conductor, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor a consecuencia de los choques que se producen contra los átomos del material por el que circula la corriente, elevando la temperatura del mismo.

La potencia  $P$  disipada en un conductor es igual a la diferencia de potencial  $V$  a la que está sometido multiplicada por la intensidad de corriente  $I$  que lo atraviesa. La energía desarrollada  $E$  es el producto de la potencia  $P$  por el tiempo  $t$  transcurrido, luego la energía  $E$  es el producto de la tensión  $V$  por la intensidad  $I$  y por el tiempo  $t$ . [11]

$$\begin{cases} P = V * I \\ E = P * t \end{cases} \rightarrow E = V * I * t \quad (4)$$

Si a esta expresión le añadimos la Ley de Ohm:

$$\begin{cases} E = V * I * t \\ I = \frac{V}{R} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} E = I^2 * R * t \\ E = \frac{V^2}{R} * t \end{cases} \quad (5)$$

Como se observa en las ecuaciones anteriores, las pérdidas por efecto Joule son directamente proporcionales al cuadrado de la intensidad de corriente que circula por los conductores. Si mantenemos la resistencia eléctrica constante (no cambiamos los conductores de la línea), y transportamos la misma energía eléctrica, incrementando 100 veces la tensión reducimos 10 000 veces las pérdidas por efecto Joule.

#### 4.2 RENDIMIENTO

El rendimiento de la línea también varía según el sistema de transporte que empleemos. Entendemos por rendimiento la relación entre la potencia absorbida por la carga,  $P_2$  y la potencia cedida por el generador,  $P_1$ , ecuación (7). La diferencia entre ambas potencias se debe a las pérdidas en la línea,  $P_L$ , ecuación (8).

$$P_1 = P_2 + P_L \quad (6)$$

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (7)$$

Las pérdidas en la línea se calculan:

$$P_L = R_L * I^2 \quad (8)$$

Vamos a comparar el rendimiento en el transporte de alterna monofásica, continua y alterna trifásica. Primero comparamos la continua con la alterna monofásica.

La transferencia de potencia a la carga vale:

$$\text{Continua } P_{2cc} = U_{2cc} * I_{cc} \quad (9)$$

$$\text{Alterna } P_{2Ac} = U_{2ef} * I_{ef} * \cos(\varphi_2) \quad (10)$$

Si se considera la misma potencia transportada en ambos casos en las mismas condiciones (mismo  $R_L$ ) y con  $U_{2cc} = U_{2ef} = U_2$ :

$$P_{Lcc} = R_L * I_{cc}^2$$

$$P_{LAc} = R_L * I_{ef}^2 = R_L * \frac{I_{cc}^2}{\cos^2(\varphi_2)} \Rightarrow P_{Lcc} = P_{LAc} * \cos^2(\varphi_2)$$

$$I_{ef} = \frac{P_{2Ac}}{U_{2ef} * \cos(\varphi_2)} = \frac{I_{cc}}{\cos(\varphi_2)}$$

Se puede concluir que para unas mismas condiciones en el transporte (misma tensión y potencia para el mismo cable) las pérdidas en continua (CC) disminuyen respecto a alterna monofásica (AC).

Éstos cálculos se han hecho suponiendo  $R_L$  constante, pero realmente la resistencia eléctrica disminuye en CC para cables de elevado grosor debido al efecto pelicular (o efecto Skin), al aumentar la sección efectiva por donde circula la corriente. Este efecto hace que las corrientes tiendan a concentrarse en la parte exterior del cable. Por tanto, si mantenemos el rendimiento constante para la misma potencia transportada es posible reducir la sección  $S$  del cable de la línea de CC, ecuación (11):

$$S_{cc} = S_{Ac} * \cos^2(\varphi_2) \quad (11)$$

Ahora comparamos el rendimiento en el transporte de alterna monofásica a trifásica, supuesta la misma potencia transportada  $P_2$ , misma tensión monofásica que trifásica y cables del mismo material, longitud y sección:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Monofásica: } P_{2_1f} = P_2 = U_2 * I_{1f} * \cos(\varphi_2) \\ \text{Trifásica: } P_{2_3f} = P_2 = \sqrt{3} * U_2 * I_{3f} * \cos(\varphi_2) \end{array} \right\} \Rightarrow I_{3f} = \frac{I_{1f}}{\sqrt{3}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Trifásica: } P_{L_3f} = 3 * R_L * I_{3f}^2 = \frac{3 * R_L * I_{1f}^2}{3} = R_L * I_{1f}^2 \\ \text{Monofásica: } P_{L_1f} = 2 * R_L * I_{1f}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{L_3f} = \frac{P_{L_1f}}{2} \quad (12)$$

De estas fórmulas deducimos que la intensidad de la corriente que circula por el conductor en el sistema trifásico es  $\sqrt{3}$  veces menor que la que circula en monofásico, lo cual es muy

importante ya que las pérdidas en la línea son proporcionales al cuadrado de la intensidad de corriente. [9]

Eso se observa claramente en la ecuación (12) de este apartado, en el cual vemos que las pérdidas se reducen a la mitad en trifásica.

Con este análisis se observa que la forma más efectiva de realizar el transporte es con corriente continua (actualmente los sistemas conocidos como HVDC) al que le sigue la corriente alterna trifásica (los sistemas HVAC).

El transporte en CC en alta tensión estuvo inicialmente limitado a unos miles de voltios debido a la imposibilidad de construir generadores de CC de alta tensión. Actualmente, con los avances en los semiconductores, se pueden construir etapas elevadoras-rectificadoras capaces de convertir tensiones trifásicas de muy alta tensión en tensiones continuas y etapas inversoras-reductoras que transforman las tensiones continuas en trifásicas de media tensión.

## 5. DESCRIPCIÓN MAQUETA ORIGINAL

Como ya se ha comentado en el apartado de objetivos, la maqueta requería una serie de mejoras importantes tanto para tener un mejor efecto visual como para su funcionamiento práctico.

Las bases de las torres eran de madera aglomerada de gran tamaño y peso, lo que suponía un inconveniente para manejar la maqueta y sobre todo para su transporte. Además al no estar decoradas, visualmente no resultaban realistas. En ellas estaban atornilladas dos bases de metacrilato con las bananas de seguridad donde iban conectados los cables de la línea (Fig. 5.1).

Los bancos de transformadores estaban conectados a 220 / 9 V. Originalmente estaban muy bien hechos, montados sobre una estructura de metacrilato y con bornes de seguridad para su conexión. Los cables de las conexiones de los transformadores eran muy finos y tenían un aspecto muy frágil (Fig. 5.2).

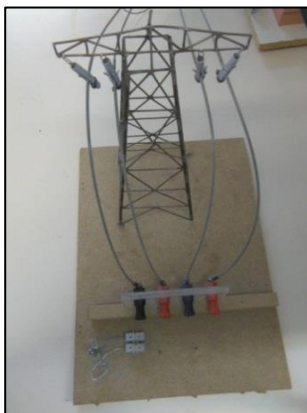


Fig. 5.1. Vista de la base y la torre.

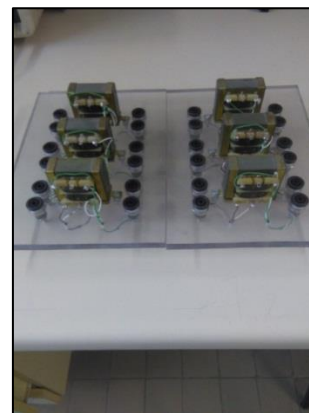


Fig. 5.2. Banco de transformadores.

El usuario final al que le llegaba la energía eléctrica consistía en una base de madera, en la cual había montadas dos casas con bombillas en su interior, y tres barras huecas con el cableado por dentro que tenían un diodo led en el extremo superior, simulando unas farolas. Las casas estaban hechas con maderas finas, con agujeros en las dos de la parte superior que formaban el tejado, y cubriendo el agujero papel azul transparente para que se viese la iluminación (Fig. 5.3).

Las torres son la parte que más atención precisaban de toda la maqueta por su estado. Las pequeñas barras de acero que las forman estaban oxidadas y faltaban varias que se habían despegado y perdido. Los aisladores de las torres eran unos tacos unidos a unos clips que se sujetaban a la torre. El cable pasaba por el interior de los tacos de plástico. Otro problema era el conexionado, porque estaba toda la maqueta unida, desde una base de la torre a la otra y el cable estaba fijado a las torres sin posibilidad de soltarlo. Todo esto hacía que las dos bases con sus torres formasen un bloque, lo cual dificultaba mucho su transporte (Fig. 5.4 y 5.6).

Las torres no estaban fijadas a las bases salvo por el cable que las unía, por tanto no tenían mucha estabilidad (Fig. 5.5).



Fig. 5.3. Consumidor final.



Fig. 5.4. Torre y aisladores.



Fig. 5.5. Sujeción original de la torre.



Fig. 5.6. Aisladores originales.

## 6. INTERVENCIONES SOBRE LA MAQUETA ORIGINAL

Primero se desmontó la maqueta original: quitar el cable que unía ambas bases y soltarlo de las torres, quitar los tacos que hacían de aisladores en las torres y desatornillar el metacrilato de las bases.

### 6.1 TORRES

- Con alambre del mismo grosor que las barras que forman las torres y utilizando pegamento de impacto, cortar a la medida y colocar las barras donde faltaban.
- Limpieza de las torres para quitarle suciedad y restos de adhesivo.
- Uso de un spray de color aluminio para pintarlas, tanto para hacer las torres más reales cómo para protegerlas del óxido.
- Adhesión con pegamento de impacto de los nuevos aisladores a las torres.
- Fijación de las torres a la base con adhesivo.
- Insertar las bananas de seguridad en los aisladores.
- Doblar a la medida cable rígido de cobre.
- Soldar con estaño el cable rígido a las bananas del metacrilato y de los aisladores.



Fig. 6.1. Torre alta tensión.



Fig. 6.2. Torre alta tensión terminada.

### 6.2 AISLADORES

Se han fabricado unos aisladores más realistas que los que tenía la antigua maqueta. Se utilizó cable rígido de cobre desnudo con barniz como aislante, trozos de aislante de PVC gris de un cable de 2,5 mm<sup>2</sup> y botones simulando los platos de cerámica.

- Corte del cable a la medida apropiada.
- Mecanizado con un alicate de punta redonda de uno de los extremos para formar un círculo, donde se unen unas bananas de seguridad pequeñas para poder conectar el cable.

- Los botones se han taladrado en el centro con la medida del diámetro del cobre.
- Corte del aislante de PVC gris a la medida apropiada.
- Por el lado no doblado, se han introducido alternativamente botones con trozos del aislante, y luego fijado con pegamento de impacto para evitar que se muevan.

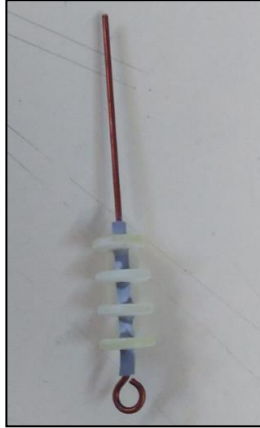


Fig. 6.3. Aislador.

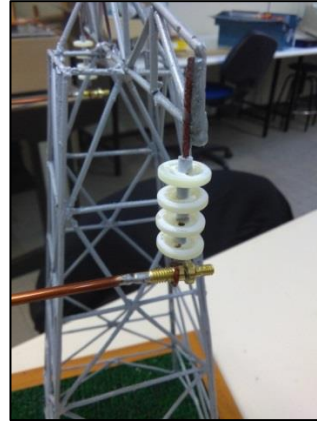


Fig. 6.4. Aislador fijo a la torre.

### 6.3 BASES

- Compra de materiales para crear unas bases más apropiadas y útiles para la maqueta, con menor peso y tamaño para el transporte y manejo: Madera de grosor de 1 cm, césped artificial, embellecedores para los bordes de las bases, patas para colocar en la parte de debajo de la base.
- La madera se cortó con las medidas 20 x 8 cm para que pudiesen guardarse en cajas de tamaño A4.
- Corte del césped artificial a medida para cubrir la parte superior de las bases fijado con adhesivo y sujetos por el embellecedor.
- Corte de los embellecedores a medida para cubrir los cuatro lados de la base y uso de adhesivo para fijarlos.
- Patas para que la base tenga un buen soporte, ya que el embellecedor tenía más longitud que la madera y la base se apoyaba sobre él.

Con ello se han hecho cinco bases iguales: dos para las torres, dos para los bancos de transformadores y uno para la representación de un usuario-consumidor al cual le llega la electricidad para su consumo.



Fig. 6.5. Base de la maqueta.



Fig. 6.6. Patas de la base.

#### 6.4 TRANSFORMADORES

En los transformadores sólo se ha modificado el conexionado interno para hacer que la relación de transformación variase de  $220 / 9 \text{ V}$  a  $127 / 9 \text{ V}$ , porque para el nivel de tensión usado en la maqueta era más conveniente. Al no poder superar los  $50 \text{ V}$  de corriente alterna (AC), este cambio permitía aumentar el nivel de tensión a la entrada de los transformadores al hacer menor la relación de transformación.

- Se han modificado los conductores que hacían esta conexión por unos más gruesos y vistosos, generando un efecto más real de los transformadores.
- Taladro en las cuatro puntas de la base y en el metacrilato.
- Fijación a la base del metacrilato mediante tornillos con topes.



Fig. 6.7. Vista lateral de los transformadores.



Fig. 6.8. Banco de transformadores.

#### 6.5 CONSUMIDOR FINAL

Compra en una tienda de modelismo, a escala 1:87 (HO), de una casa, tres farolas que funcionan a  $2 \text{ V}$ , y una caja con personas vistiendo uniformes de operarios, para simular electricistas trabajando.

- Montaje de la casa, que venía por piezas.
- Sujeción del circuito de electrónica para alimentar las farolas.

- Agujeros en la base para pasarlas farolas y sus cables, y también los cables del adaptador.
- Fijar todos los materiales mediante adhesivo a la base.
- Fijar dos fichas de conexión por debajo de la base para hacer las conexiones.
- Soldadura de estaño para unir los cables de las farolas y facilitar su conexión.
- Colocación de los operarios en el consumidor final y en las torres.



Fig. 6.9. Consumidor final.

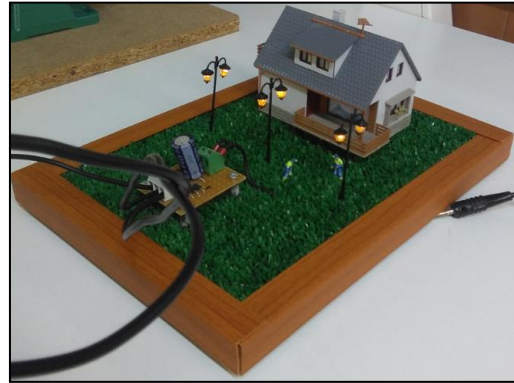


Fig. 6.10. Consumidor final en funcionamiento.

## 6.6 CONDUCTORES

Los conductores que se han colocado en la maqueta son:

- Cable de acero para la línea (de torre a torre) de diámetro 1 mm. Su longitud es de 150 cm, que es aproximadamente 5 veces la altura de la torre, de 32 cm. Representa la longitud de un vano.
- Cocodrilos en cada una de las puntas de los tres conductores de acero para poder sujetarlos en las bananas de seguridad, ya que los conectores fijos a los aisladores y los conectores macho que se pensaba unir a los conductores entraban justos; por tanto al conectar y desconectar pondríamos en peligro la integridad de varias partes delicadas de la maqueta. De esta forma se engancha el cocodrilo y esa parte no sufre ningún esfuerzo.
- Cable rígido entre el metacrilato de las bases de las torres y el aislador de la torre, lo cual refuerza la sujeción de la torre a la base.
- Bananas y cables de seguridad cortos para las conexiones de los transformadores en triángulo o estrella, para que no sobrase mucho cable.



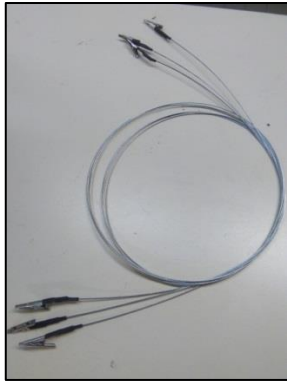


Fig. 6.11. Cable de acero de la línea.



Fig. 6.12. Cable rígido de las torres.

### 6.7 ALIMENTACIÓN A LAS FAROLAS

Uso de una placa electrónica con un rectificador trifásico para cambiar la tensión de salida del transformador al consumidor final de alterna (AC) a continua (DC) a 2V para alimentar las farolas. En la realidad para el alumbrado se trabaja con alterna, normalmente sacando el neutro de la conexión del transformador y utilizando una de las tres fases, pero como se utilizan farolas para maquetas alimentadas a 2V de corriente continua, es necesaria esta adaptación extra.

Al trabajar con tensiones muy pequeñas no es demasiado importante el valor exacto de la resistencia y el condensador:

- Se ha puesto un condensador de capacidad 470  $\mu\text{F}$  para que no almacene demasiado tiempo energía al desconectar el generador y 63 V para que soporte la tensión.
- una resistencia de 100  $\Omega$  de cuyo cálculo se hizo teniendo en cuenta una intensidad por las lámparas de 2 V de unos 20 mA:

se ha previsto tener una tensión aproximada de 4 V a la salida del generador, y como queremos 2 V en las farolas:

$$R = \frac{(V_{entrada} - V_{led})}{I} = \frac{(4 - 2)V}{0,02 A} = \frac{2}{0,02} = 100 \Omega \quad (13)$$

En la placa se ha montado un circuito electrónico para convertir la tensión a la que necesitamos:

- Uso de 6 diodos para formar un rectificador trifásico.
- Condensador para el rizado de la onda a la salida del rectificador.
- Resistencia en serie al circuito de las farolas para disminuir la intensidad que circule por las lámparas.

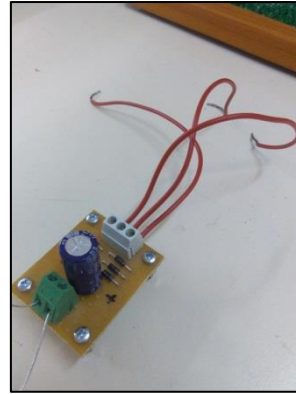
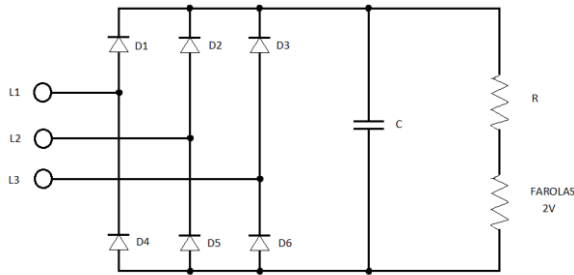


Fig. 6.13. Rectificador trifásico de 2 V DC.

Fig. 6.14. Circuito rectificador que alimenta las farolas.

### 6.8 GENERADOR (FUENTES DE ALIMENTACIÓN)

Al no poder superar los 50 V de tensión en la línea, ya que es la tensión de seguridad al no tener aislamiento, la tensión trifásica que alimenta a la maqueta tiene que ser de un valor bastante bajo, de 5 V máximo.

Como posible fuente de alimentación, se plantearon inicialmente dos soluciones:

A.- Autotransformador trifásico (Fig. 6.15): Se pensó utilizar el autotransformador trifásico para la generación de la tensión trifásica que se va a transportar.

Presentaba ventajas respecto a la opción que se ha utilizado:

- Ausencia de ruido.
- Una mejor forma de onda y frecuencia.
- Variación de la tensión.

Podemos observar en la Fig. 6.16 imágenes de las pruebas en el laboratorio:



Fig. 6.15. Autotransformador trifásico.



Fig. 6.16. Prueba con autotransformador.

Sin embargo, se ha descartado finalmente por las desventajas:

- Precisa de una toma trifásica que es infrecuente encontrar en lugares públicos como colegios, bibliotecas, museos, y por tanto es una restricción para el lugar donde se puede utilizar la maqueta.
- No puede apreciarse el proceso de generación de energía eléctrica, que para el uso docente y divulgativo del proyecto es un valor añadido.

B.- Generador trifásico de imanes permanentes: Descartando el autotransformador, por las razones explicadas en el apartado anterior, para la generación de la tensión trifásica vamos a utilizar un generador trifásico realizado como proyecto fin de carrera de la EINA, por el estudiante Aiman Fuertes dentro de las actividades del Edemuz [12]. La tensión trifásica es generada mediante un rotor de imanes permanentes de un par de polos que se mueve mecánicamente con un taladro que se alimenta desde la red monofásica, del cual regulamos la velocidad de giro y por tanto la tensión generada en los bornes del generador.

Existe un vídeo divulgativo de este proyecto del Edemuz que se puede visualizar en YouTube. [13]

Se realizaron varios cambios en el generador:

- Se ha eliminado el regulador de velocidad del taladro, ya que al trocear la señal que le llegaba generaba más ruido que conectándolo directamente a la red.
- Desconexión del resto de componentes de la maqueta que no utilizábamos.
- Se empleó el taladro original pero sin tantas sujeciones.
- Incorporación de un interruptor a la entrada del generador para el encendido y apagado.



Fig. 6.17. Generador imanes permanentes.

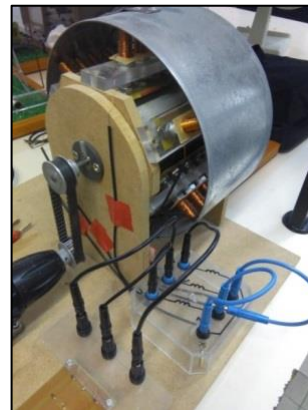


Fig. 6.18. Conexiones de salida trifásica.

En el apartado de problemas que nos han surgido se explica bien todo el proceso que se ha seguido hasta finalizar las modificaciones.

## 6.9 BANANAS DE SEGURIDAD

Al convertir la maqueta a una línea trifásica, las bananas de seguridad incrustadas en metacrilato ya no servían, así que se han hecho nuevas bases del mismo material con otras bananas, tal como se observa en la Fig. 6.19.



Fig. 6.19. Metacrilato con las bananas de seguridad.

## 7. CONCLUSIONES

Se ha pretendido con la realización de este trabajo crear un material que sea de ayuda para la docencia en temas de electricidad, ya que incluyendo el proyecto del generador que alimenta nuestra maqueta, se puede ver de forma cercana a la real todo el proceso desde la generación de la electricidad hasta el consumo final de la misma.

También, como se ha comentado anteriormente, puede emplearse como medio de divulgación. No solo por su uso delante de alumnos, sino que gracias a material audiovisual complementario [14], aumenta mucho la posible divulgación para cualquier clase de público que esté interesado en el tema.

La maqueta resultante es un instrumento que puede ayudar a la hora de afianzar conceptos en futuros alumnos de tecnología eléctrica, y en motivar a otros estudiantes con menos formación a entender el funcionamiento básico de la electricidad y su transporte.

La electricidad es algo que todos utilizan en su vida cotidiana, y me parece interesante que conozcan de forma simple todo el proceso que se sigue para poder disponer de ella en nuestros hogares.

### 7.1 PROBLEMAS EN LA REALIZACIÓN Y POSIBLES MEJORAS

#### A. INCONVENIENTES

Durante la realización de este proyecto se han presentado dificultades y problemas que se han tenido que resolver, de la mejor manera posible, para finalizar la maqueta con éxito.

A continuación vamos a comentarlos:

- Generador y fuente de alimentación

Cambios que se habían realizado:

- Cambiar el taladro que mueve el rotor por otro más silencioso.
- Eliminar el regulador de velocidad.
- Alimentar el nuevo taladro con una fuente de alimentación del laboratorio a 12 V de continua, la cual se conecta a la red.
- Desconectar la parte final de ese generador para utilizar los bornes que alimentarán al banco de transformadores en la entrada de la línea.
- Uso de bridas, pasándolas por agujeros practicados en la base de la maqueta del generador, para sujetar el nuevo taladro a la base.



Fig. 7.1. Generador imanes permanentes con taladro 12 V

Tras estos cambios en el generador para alimentar el nuevo taladro con 12 V de tensión continua, me di cuenta de que dificultaba más el funcionamiento al ser necesario incorporar un equipo auxiliar, una fuente de alimentación conectada a la red. Se requiere una corriente bastante alta (más de 7,5 A) que no todas las fuentes pueden suministrar con esa tensión. Lo que no se va a volver a colocar es el regulador de velocidad, ya que al trocear la tensión para la regulación, todavía generaba un sonido más fuerte durante el funcionamiento.

- Fragilidad de la maqueta en las uniones

Muchas de las uniones de la maqueta original se realizaron mediante soldadura de estaño o adhesivos, que suponen uniones frágiles y pueden soltarse fácilmente si se realiza un uso inadecuado. Incluso teniendo cuidado al manipular la maqueta, puede darse el caso de que se suelte alguna de las partes.

- Funcionamiento de los transformadores

La relación de transformación no es la teórica, sino que se ha calculado de forma práctica en el laboratorio.

## B. MEJORAS

Posibles cosas que se podrían modificar o añadir para la mejora de la maqueta:

- Uso de amperímetros y voltímetros que midan el valor eficaz, para tener el valor del consumo y tensión del experimento.
- Un equipo para el traslado de todo el conjunto de la maqueta de la forma más eficiente posible, de forma segura para los materiales y lo más cómoda posible para la persona que lo lleve a cabo.
- Instalación de un motor más silencioso en el generador.
- Tapar el circuito del adaptador de tensión en la base del consumidor final.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Al Equipo Docente de Electromagnetismo de la Universidad de Zaragoza, especialmente a mi tutor del trabajo Antonio Usón, y al maestro de laboratorio del departamento de Ingeniería Eléctrica Carlos Millán por su guía y ayuda en la parte de montaje de la maqueta.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.unizar.es/icee04/innovadoc/index.htm#page=page-1>. (15/01/2017)
- [2] <https://www.youtube.com/user/edemuz>. (25/01/2017)
- [3] [https://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_de\\_la\\_electricidad](https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_electricidad) (03/12/2016)
- [4] [https://es.wikipedia.org/wiki/Generador\\_el%C3%A9ctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Generador_el%C3%A9ctrico) (19/12/2016)
- [5] [http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/funcionamiento-de-los-transformadores](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/funcionamiento-de-los-transformadores) (05/12/2016)
- [6] <https://es.wikipedia.org/wiki/Transformador> (05/12/2016)
- [7] Ras, E. "Transformadores de potencia, de medida y de protección." Marcombo Boixareu. Barcelona. 1988.
- [8] <http://slideplayer.es/slide/3934058/> (08/12/2016)
- [9] Apuntes de la asignatura de líneas eléctricas de la universidad de Zaragoza, Autores: Antonio Usón y Jesús Letosa, Curso 2014-2015. (16/01/2017)
- [10] [http://www.ptd.siemens.de/070201\\_AC1000kV\\_GRIDTECH.pdf](http://www.ptd.siemens.de/070201_AC1000kV_GRIDTECH.pdf) (22/01/2017)
- [11] [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Joule](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule) (05/01/2017)
- [12] Alternador trifásico de imanes permanentes, <http://zagan.unizar.es/record/37190?ln=es> (09/01/2017)



[13] <https://www.youtube.com/watch?v=-REZoG1sd3o> (12/01/2017)

[14] <https://www.youtube.com/watch?v=Oz6swGdJJjQ> (01/02/2017)

### 9.1 PROCEDENCIA DE LAS IMÁGENES

[1] <http://www.unizar.es/icee04/innovadoc/index.htm#page=page-1>

[2] [http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/funcionamiento-de-los-transformadores](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/funcionamiento-de-los-transformadores)

[3] <https://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>

[4] [www1.ceit.es/asignaturas/SistElec/Practicas/PR\\_SIS\\_01.pdf](http://www1.ceit.es/asignaturas/SistElec/Practicas/PR_SIS_01.pdf)

[5] <http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com.es/2014/12/circuito-equivalente-transformador.html>

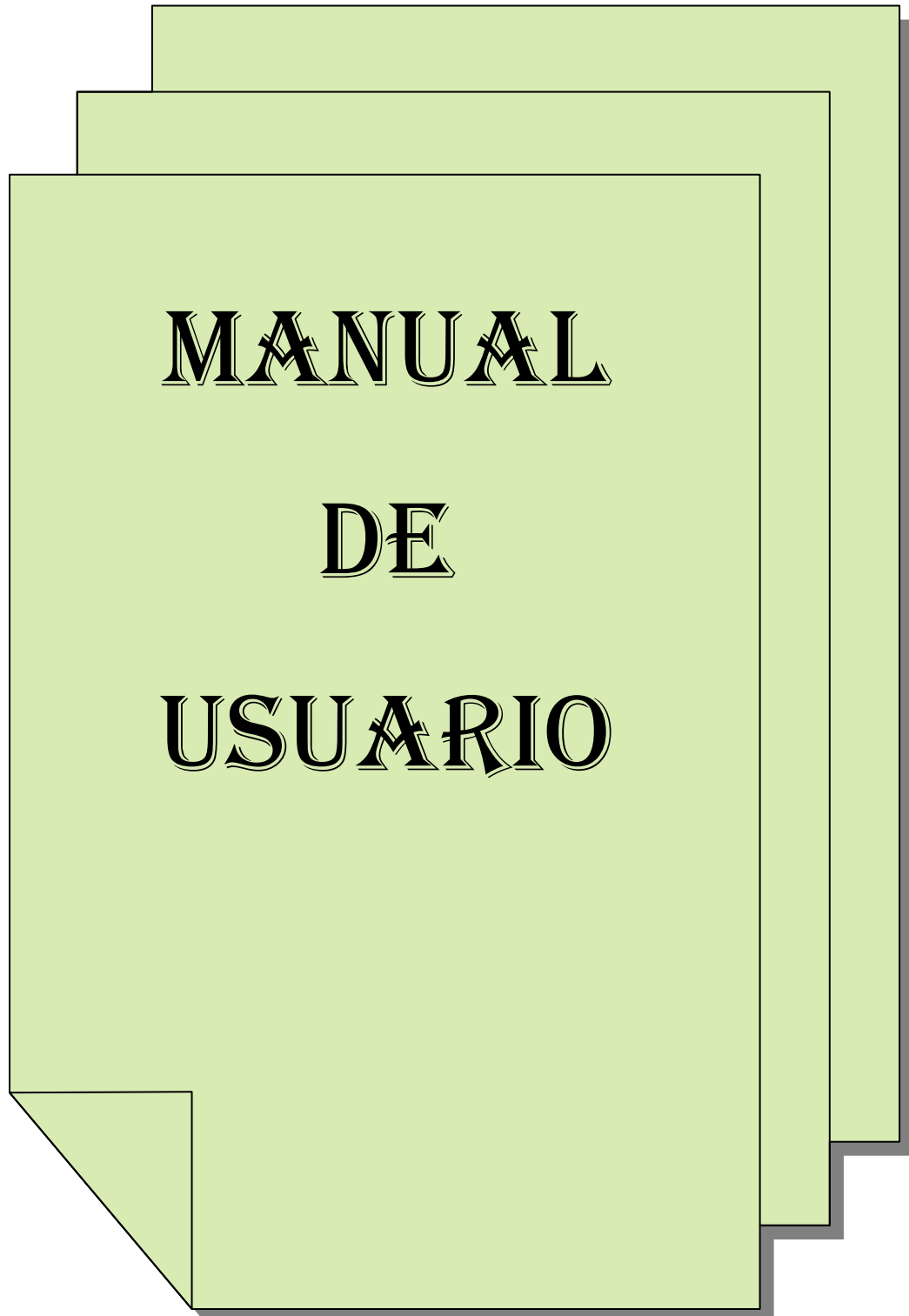
[6] [http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/pagina\\_n1.htm](http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/pagina_n1.htm)

[7] <http://slideplayer.es/slide/3934058/>

[8] [http://www.ptd.siemens.de/070201\\_AC1000kV\\_GRIDTECH.pdf](http://www.ptd.siemens.de/070201_AC1000kV_GRIDTECH.pdf)

# ANEXO






## MANUAL DE USUARIO

### 1. RIESGOS Y ADVERTENCIAS

Aunque vamos a trabajar siempre por debajo de la tensión de seguridad, 50 V en alterna (AC), debemos ser cuidadosos a la hora de manipular elementos eléctricos. Es preferible que quien vaya a manipular la maqueta tenga conocimientos básicos de electricidad.

No serán necesarios EPI's (Equipos de protección individual) de protección eléctrica, ya que la maqueta está diseñada para trabajar con tensiones no peligrosas.


Aun así debemos tomar ciertas precauciones:

 Conexión del taladro a la red:


- No tener las manos mojadas.
- Asegurarnos que el aislamiento en la parte del cable que toquemos al realizar la conexión no está dañado.

 Protección contra contactos directos:


- Cuando la maqueta esté en funcionamiento, evitar tocar cualquiera de los conductores desnudos o puntos de conexión para evitar un contacto directo entre fase-fase, fase-tierra o fase-masa.

 Protección contra contactos indirectos:

- Al trabajar con una tensión que no supera la de seguridad, no se ha comprobado que todas las partes de la maqueta queden completamente aisladas de una posible fuga a tierra, pudiendo quedar alguna de las masas, especialmente alguna de las torres, en tensión. Esto podría provocar un contacto indirecto si alguien tocase ese objeto, y aunque no sean tensiones peligrosas es mejor evitar accidentes.

 No utilizar:

- ropa ancha ni con mangas.
- Pulseras ni collares

 Peligro de atrapamiento debido al movimiento rotativo del taladro que acciona el generador y del mismo generador de imanes permanentes.

- En caso de atrapamiento, abrir inmediatamente el interruptor.



Sí que es recomendable el uso de un equipo de protección auditiva si se va a manipular la maqueta.

Utilizar protectores auditivos para la puesta en marcha del experimento, ya que el taladro genera ruido que puede resultar molesto si nos encontramos cerca durante su funcionamiento.

## 2. COMPONENTES DE LA MAQUETA

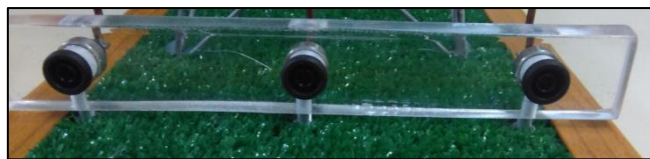
- Cable con recubrimiento aislante



- Bananas de seguridad



- Bases de metacrilato



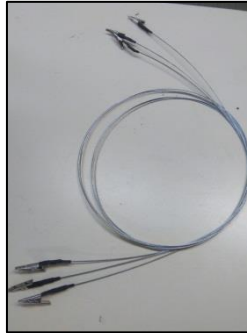
- Torres AT



- Transformadores 127/9 V



- Cable de acero (línea)



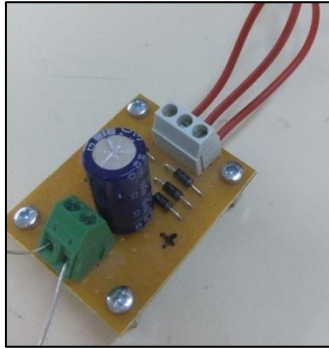
- Farolas 2 V



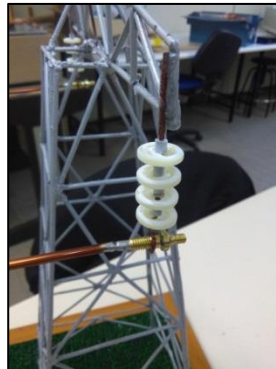
- Cable rígido (torres-base)



- Adaptador de tensión alterna → continua



- Aisladores



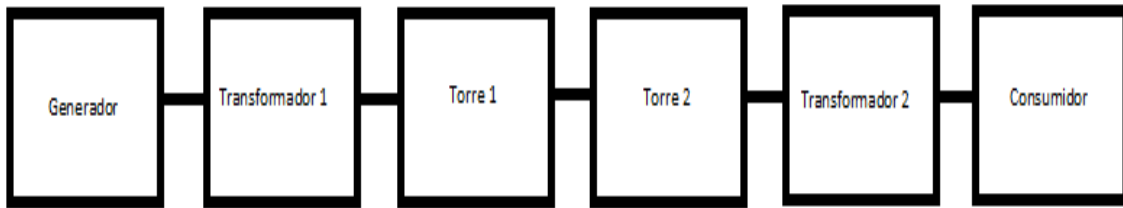
- Generador trifásico



### 3. DIAGRAMA DE BLOQUES

La maqueta ha de colocarse en un orden determinado, así que para evitar confusiones se adjunta este diagrama de bloques (Fig. 3.1.) para ver la ubicación de cada componente respecto a los otros. Los bancos de transformadores son iguales, por tanto sólo debemos estar atentos de su conexionado y de qué lado es el de 9 V y cual el de 127 V.

Las torres son idénticas así que no importa cual usemos de torre 1 o torre 2.



**Fig. 3.1.** Diagrama de bloques de la maqueta

#### 4. FUNCIONAMIENTO DEL EXPERIMENTO

Antes de explicar cómo hacer funcionar el experimento correctamente, haremos una breve introducción para entender qué estamos haciendo.

La maqueta simula el transporte y distribución de electricidad desde su generación hasta su utilización por parte de los consumidores. Obviamente lo hace de una forma muy simplificada ya que en la realidad tiene más elementos a tener en cuenta, pero así puede hacer que se entienda el fundamento del proceso de transporte y distribución de la energía eléctrica.

La cuestión principal que tratamos de responder es por qué elevamos la tensión para su transporte, y la respuesta es que de esta forma conseguimos menores pérdidas por el paso de corriente en los conductores (efecto Joule) y beneficios económicos al reducir sección y peso de cables, robustez de apoyos,...

Al elevar la tensión, reducimos en el mismo porcentaje el valor de la intensidad de la corriente eléctrica y viceversa.

Vamos a realizar el montaje y conexionado de las diferentes partes.

Para ello colocaremos cada una de las bases en la posición que se explica en el diagrama de bloques de este mismo documento.

Una vez colocado todo, realizaremos las conexiones:

- Ⓢ Banco de transformadores 1: Conexión en Triángulo a la entrada de 9 V, conexión en Triángulo en la salida de 127 V (Fig. 5.1).
- Ⓢ Cables de la entrada del banco de transformadores 1 se conectan a los bornes de salida del generador de imanes permanentes.
- Ⓢ En la salida de 127 V del banco de transformadores 1, las tres fases se conectarán a los bornes de seguridad del metacrilato en la base de la torre 1.
- Ⓢ Conectar los cocodrilos de las puntas de los tres cables de acero en los bornes colocados en los aisladores de la torre 1 a la torre 2, ubicando las torres a la distancia que permita que el cable cuelgue de la forma correcta (1,5 m aproximadamente). Las

puntas de cada uno de los cables se conectarán en el aislador homólogo en ambas torres (Fig. 5.2).

- Ⓢ Banco de transformadores 2: Conexión en Triángulo en la entrada de 127 V, conexión en Triángulo en la salida de 9 V (Fig. 5.1).
- Ⓢ Conectar cables desde los bornes del metacrilato de la torre 2 a la entrada de 127 V del banco de transformadores 2.
- Ⓢ Conectar las fases de la salida de 9 V del banco de transformadores 2 a la entrada de 3 fases del circuito adaptador de tensión alterna → continua.
- Ⓢ Comprobar conexiones en la parte de abajo del metacrilato de los bancos de transformadores por si se hubiese aflojado alguna tuerca y soltado alguna conexión.
- Ⓢ Comprobar la conexión de la salida del adaptador a las farolas, que no se haya soltado ningún cable.
- Ⓢ Comprobar que el circuito electrónico está bien conectado y no se ha soltado nada.
- Ⓢ Ponerse el equipo de protección auditivo (recomendado).

Una vez estén todas las conexiones previas de la maqueta realizadas, conectamos el cable del taladro a la red de 230 V. Al cerrar el interruptor manualmente, el taladro se pondrá en funcionamiento y creará el movimiento del rotor en el generador de imanes permanentes.



#### ¡CUIDADO!

En el momento de conectar el interruptor del generador, el taladro se pondrá en funcionamiento. Tenerlo presente para no engancharse con el taladro o el generador cuando empiecen a girar.

En el momento que comience a funcionar el generador, se iluminarán las lámparas de las farolas en la parte del consumidor final de la maqueta.

## 5. CONEXIONADO DE LOS TRANSFORMADORES Y LAS TORRES

### I.- Banco de Transformadores 1 y 2 Triángulo – Triángulo.

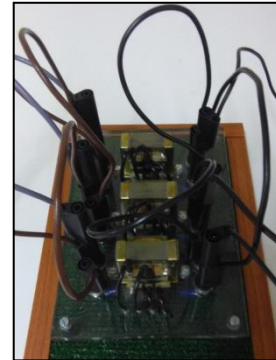
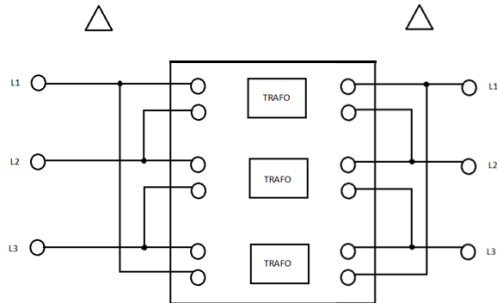


Fig. 5.1. Conexión triángulo-triángulo utilizada en el banco de transformadores 1 y 2.

### II.- Conexión entre las Torres.

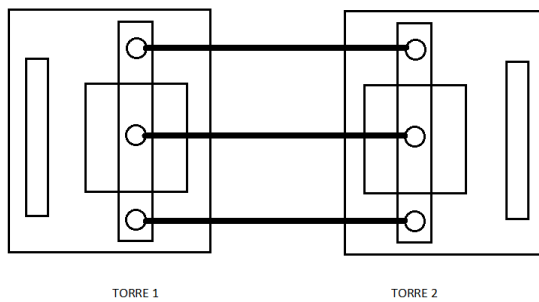


Fig. 5.2. Conexión del cable de acero entre las torres 1 y 2.