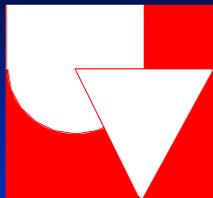


# *LA FERRORESONANCIA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN*

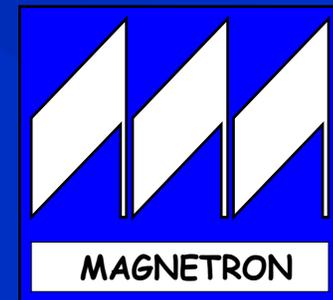
*Guillermo Aponte M.*



Universidad  
del Valle



GRUPO DE INVESTIGACION  
EN ALTA TENSION



# ***INTRODUCCION***

A continuación se hace una presentación del fenómeno de la ferresonancia y de la posibilidad de su ocurrencia cuando los transformadores de distribución son conectados a la red

## ***INTRODUCCION***

Se presenta el procedimiento de análisis del fenómeno, las pruebas realizadas en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, para determinar las condiciones de ocurrencia de la ferroresonancia cuando se emplea cable aislado y la herramienta computacional con la cual es posible predecir o confirmar su aparición.

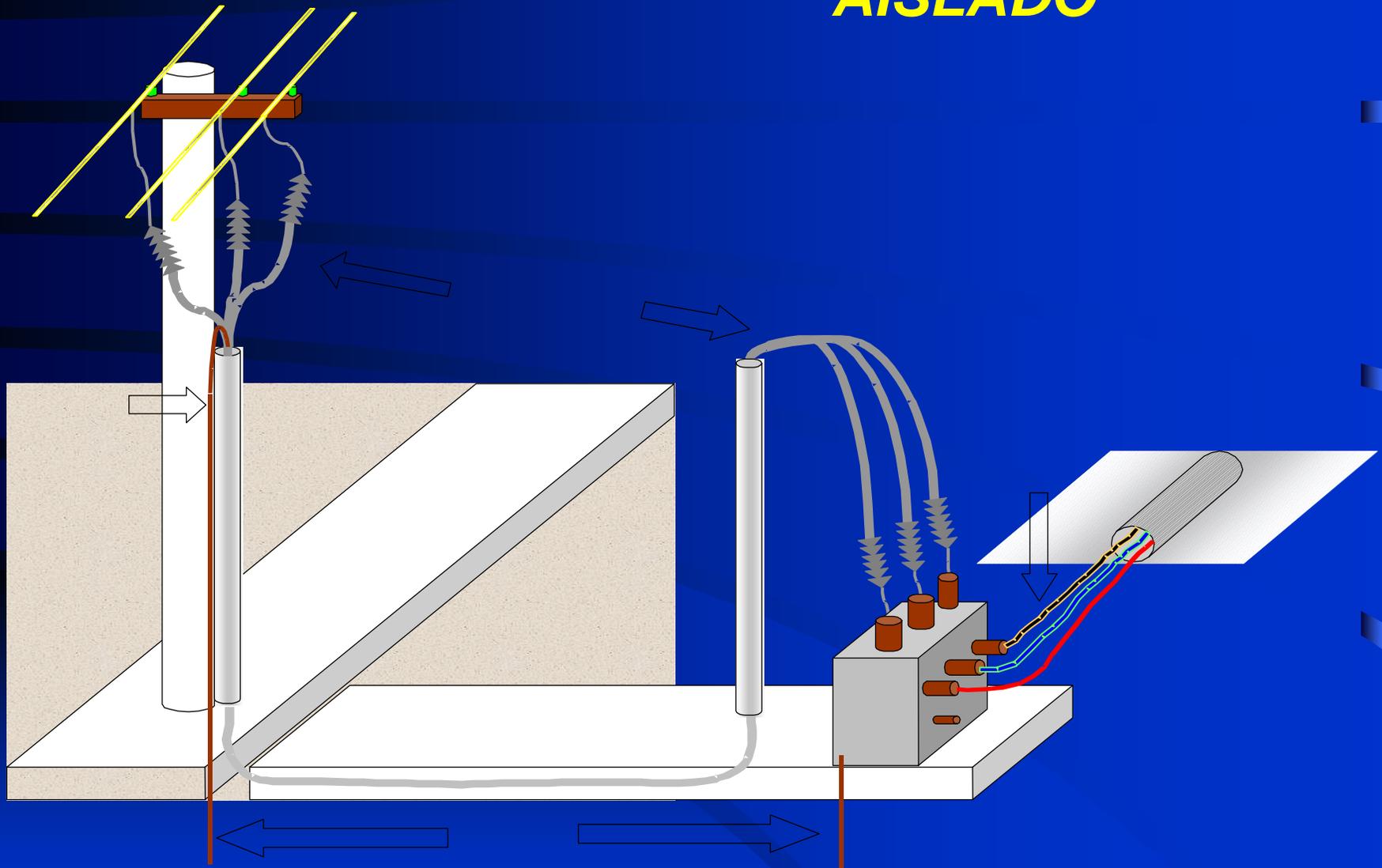
## ***INTRODUCCION***

Los transformadores tienen una gran aplicación y se pueden encontrar en cualquier parte del sistema, desde las áreas más congestionadas de las ciudades, hasta los sectores rurales poco poblados.



# **CONEXIÓN CON CONDUCTOR DESNUDO**

# CONEXIÓN CON CABLE AISLADO



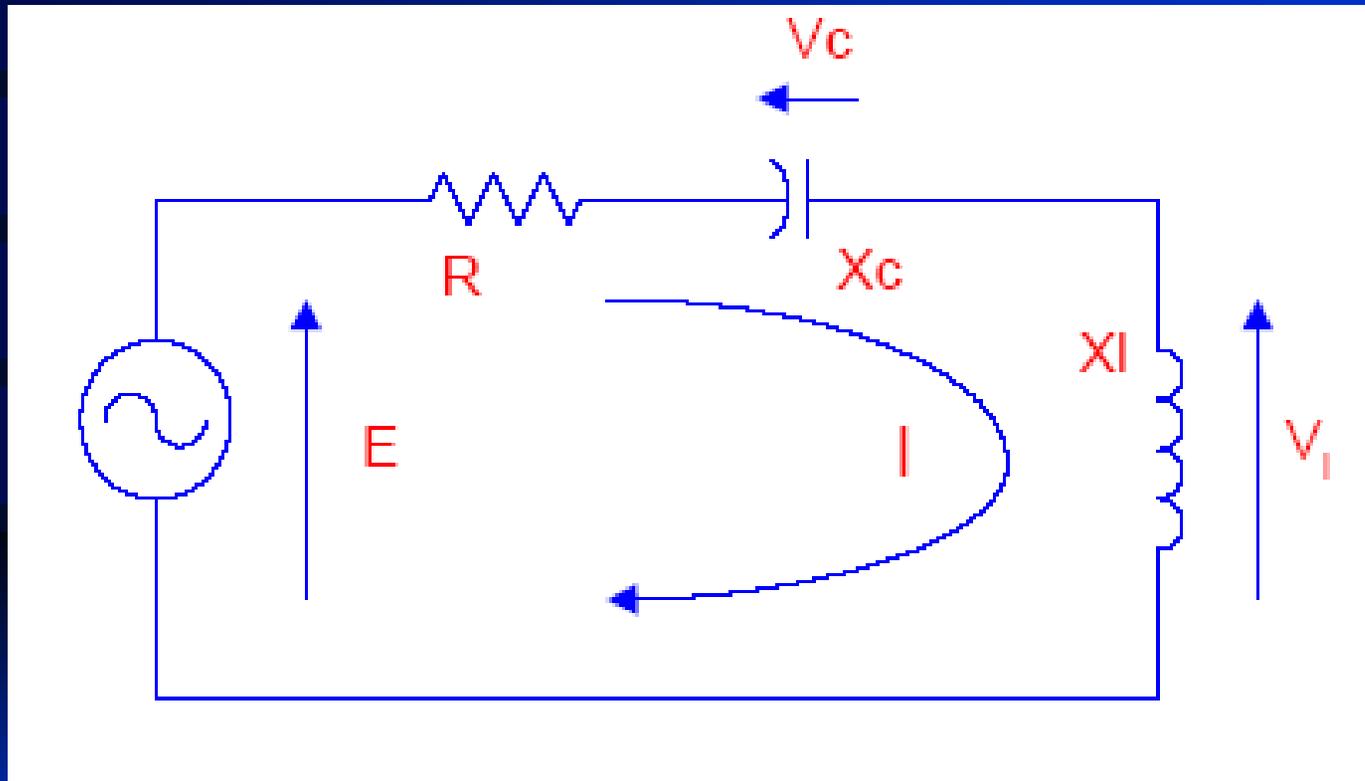
## ***PROBLEMA***

En los transformadores se presenta en ocasiones el fenómeno de la ferresonancia, pudiendo ocasionar la falla en los pararrayos, en el cable o en el transformador mismo.

## ***QUE ES LA FERRORESONANCIA ?***

Es un fenómeno usualmente caracterizado por sobrevoltajes e irregulares formas de onda, y está asociado con la excitación de una o más inductancias saturables a través de una capacitancia en serie. [ANSI/IEEE Std 100-1984]

# LA RESONANCIA SERIE



# CONDICION DE DE RESONANCIA

$$E = 10 \text{ Kv}$$

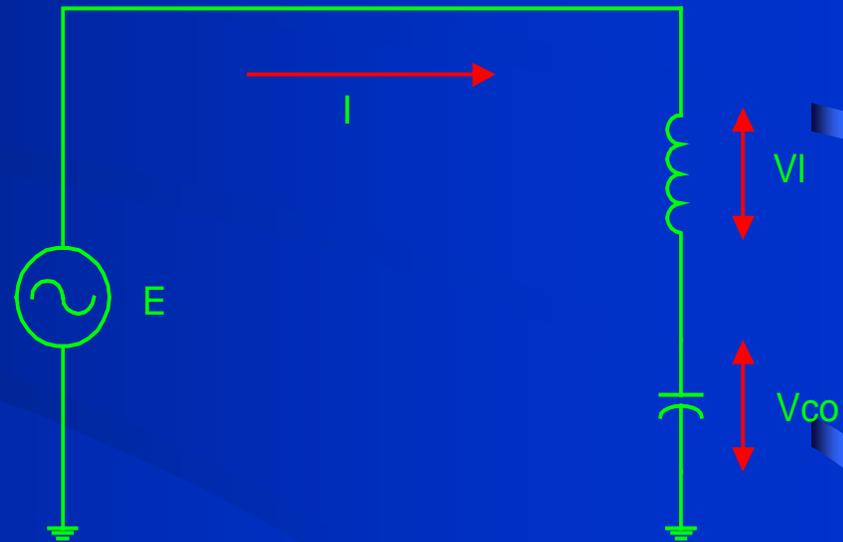
$$X_L = j 90 \text{ Ohms}$$

$$X_C = -j 70 \text{ Ohms}$$

$$I = 10 / j 20 = -j 0.5 \text{ A}$$

$$V_L = j 90 \times -j 0.5 = 45 \text{ kV}$$

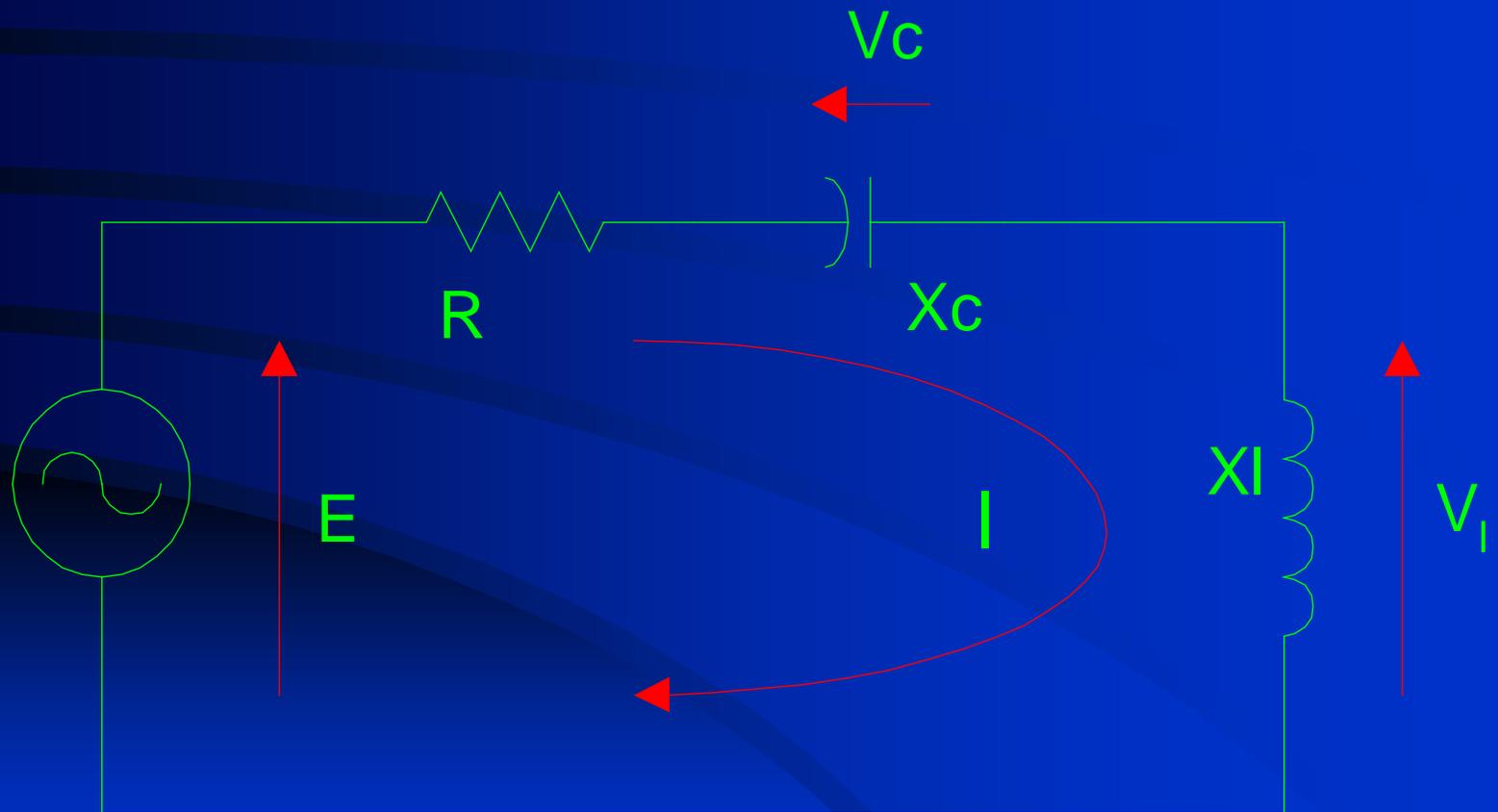
$$V_C = -j 70 \times -j 0.5 = -35 \text{ kV}$$



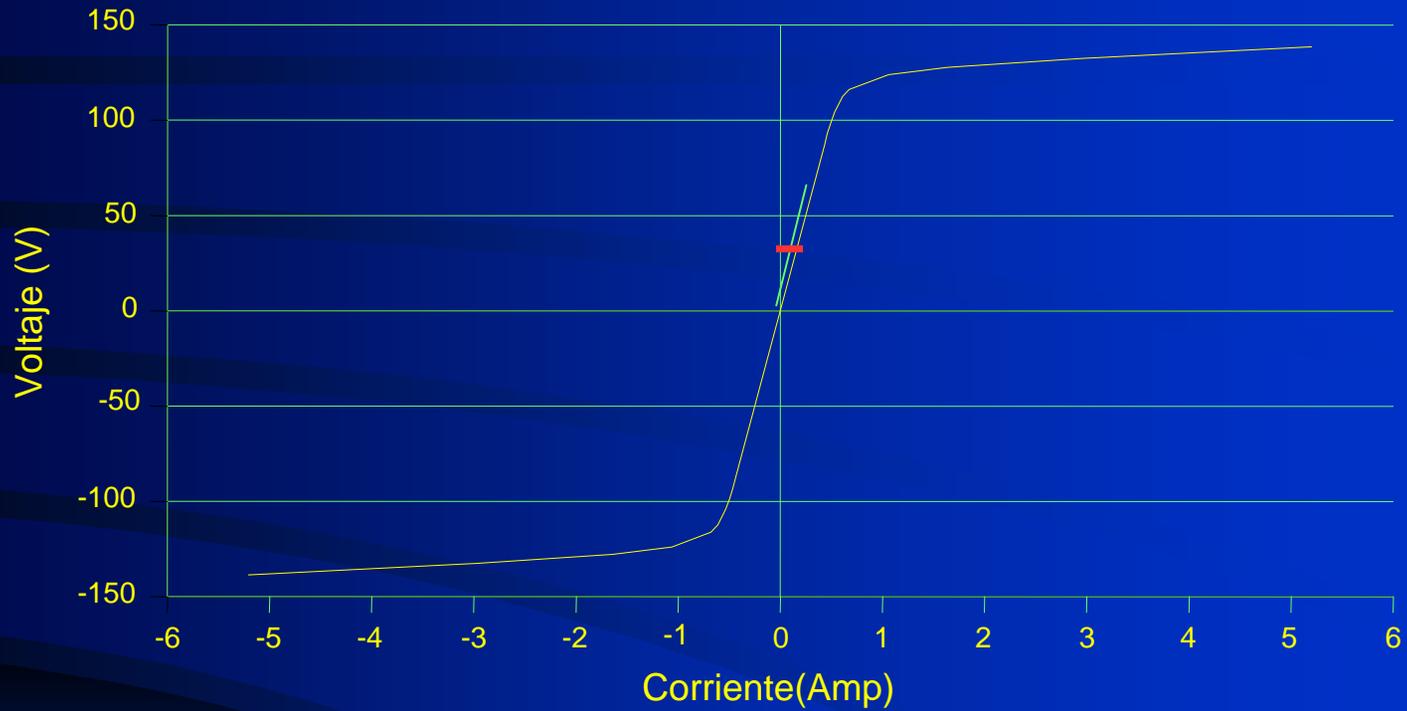
## ***CIRCUITO FERRORESONANTE***

La inductancia en un circuito simple resonante es normalmente de núcleo de aire y su valor no cambia, en un circuito ferroresonante esta tiene un núcleo de material ferromagnético que varía con el voltaje aplicado en sus terminales, existen entonces varios posibles puntos de operación y en alguno de ellos puede producirse la resonancia

# LA FERRORESONANCIA



# CURVA DE MAGNETIZACION



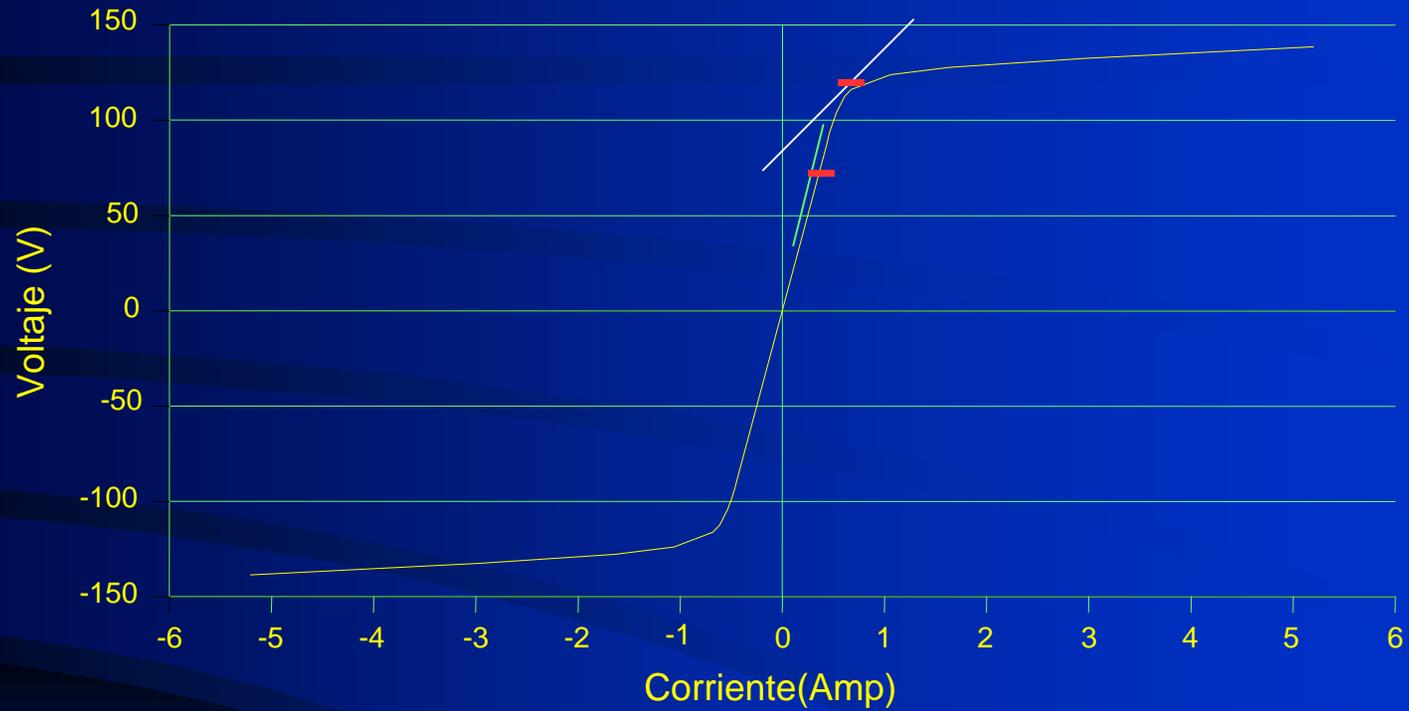
# TRANSFORMADOR MONOFASICO



# TRANSFORMADOR MONOFASICO CON UNA FASE EN FALLA



# CURVA DE MAGNETIZACION



# ***FERRORESONANCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN***

Para que se presente la ferresonancia debe existir un circuito LC serie, con un elemento de características no lineales. La capacitancia puede ser aportada por los conductores o los cables y la inductancia por un transformador con núcleo de material ferromagnético.

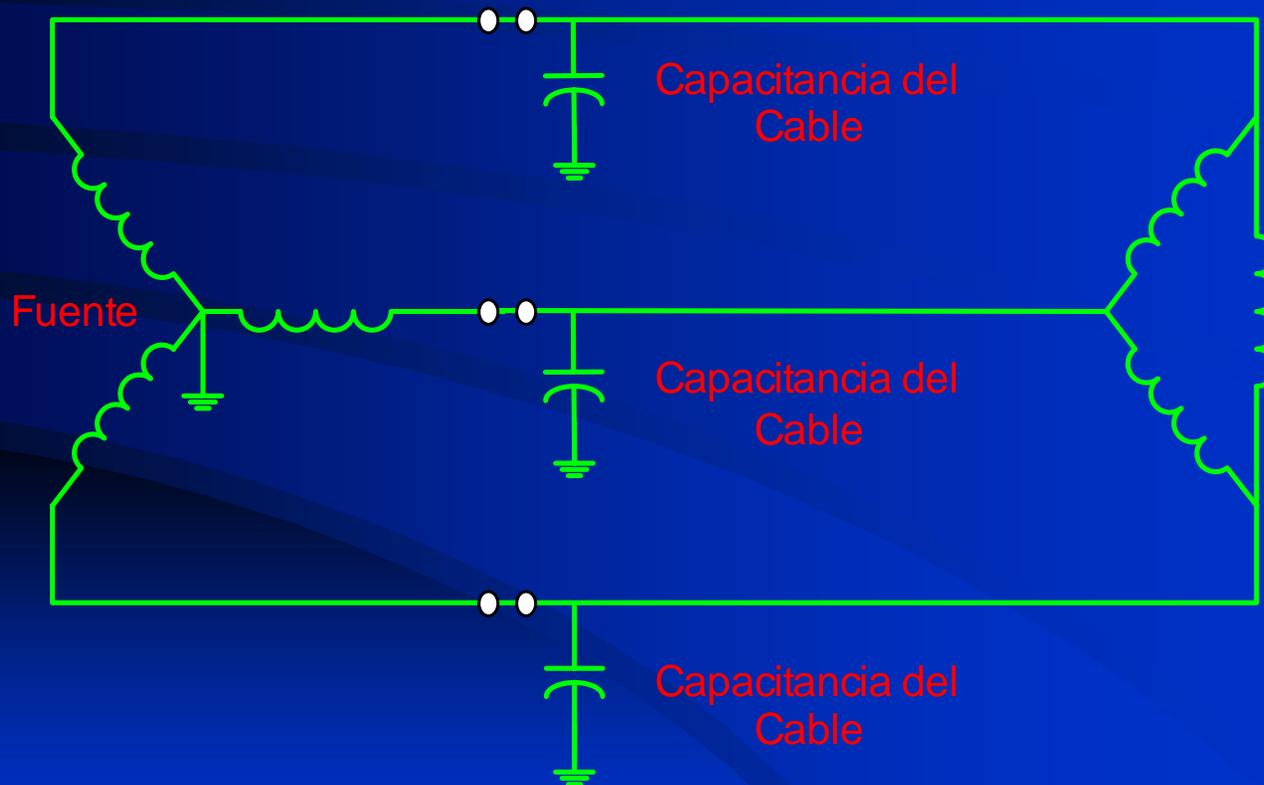
# ***CONDICIONES NORMALES***

En los circuitos de distribución operando normalmente, difícilmente se presentan las condiciones para la ferresonancia

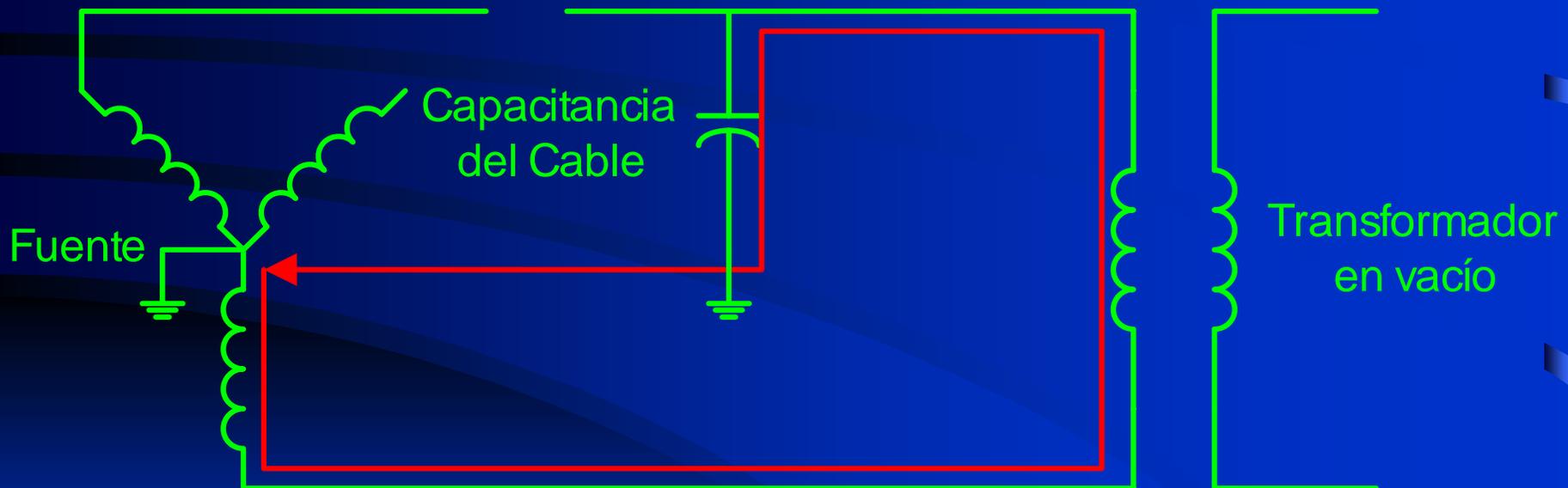
# ***CONDICIONES DE FERRORESONANCIA***

Pero un circuito serie LC se forma cuando por la energización o desenergización de una o dos fases, la reactancia capacitiva del cable es conectada en serie con la reactancia inductiva del transformador

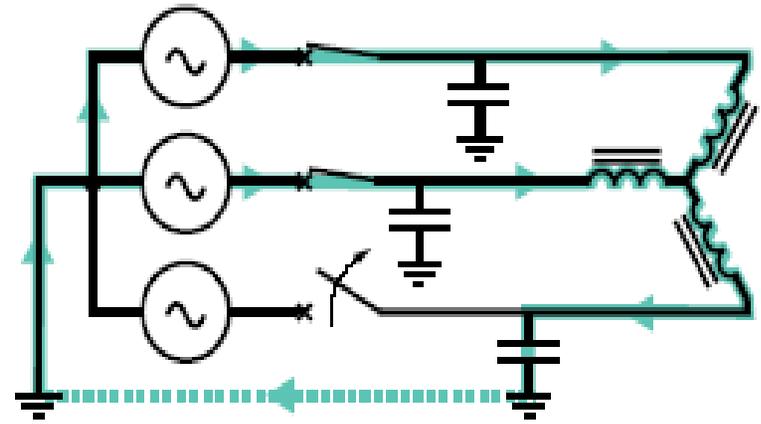
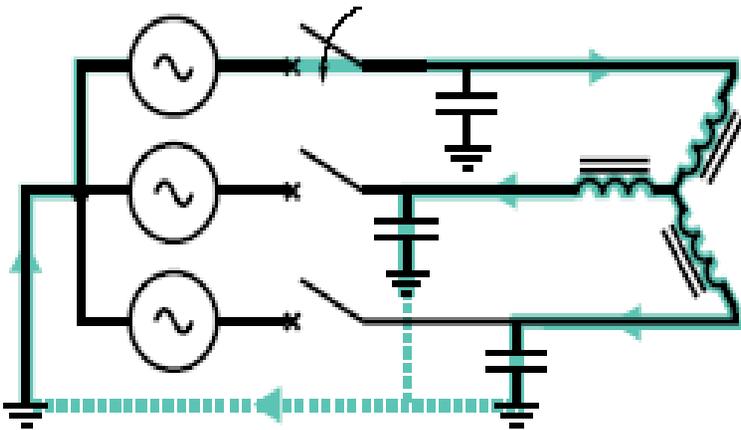
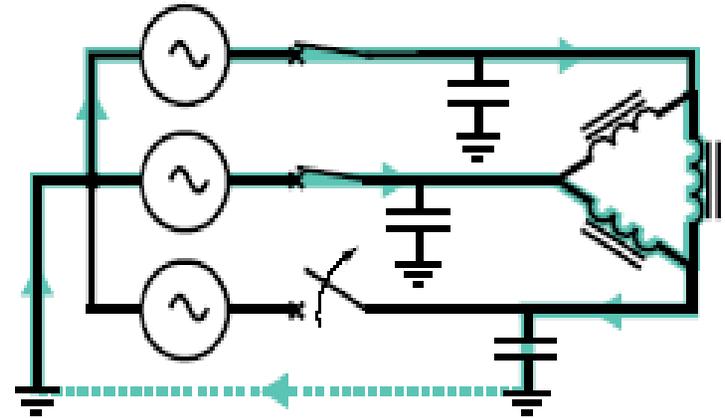
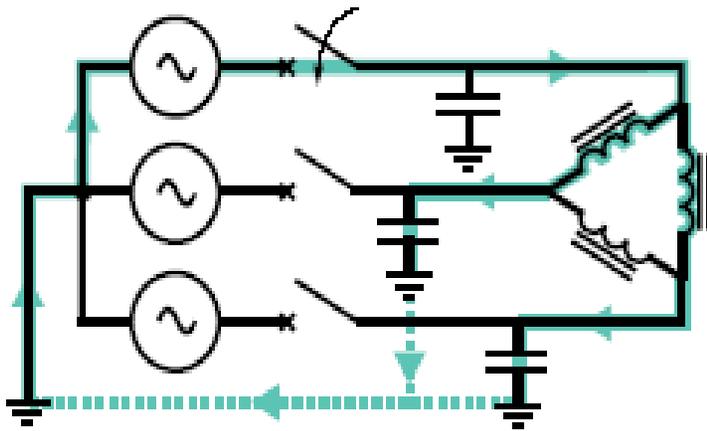
# SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL



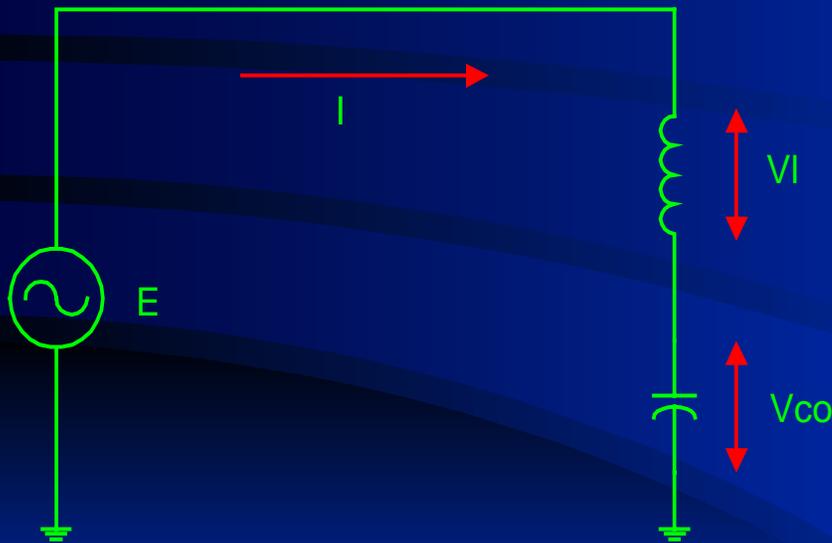
# TRANSFORMADOR MONOFASICO CON UNA FASE ENERGIZADA



# TRANSFORMADOR TRIFASICO



# ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA FERRORESONANCIA



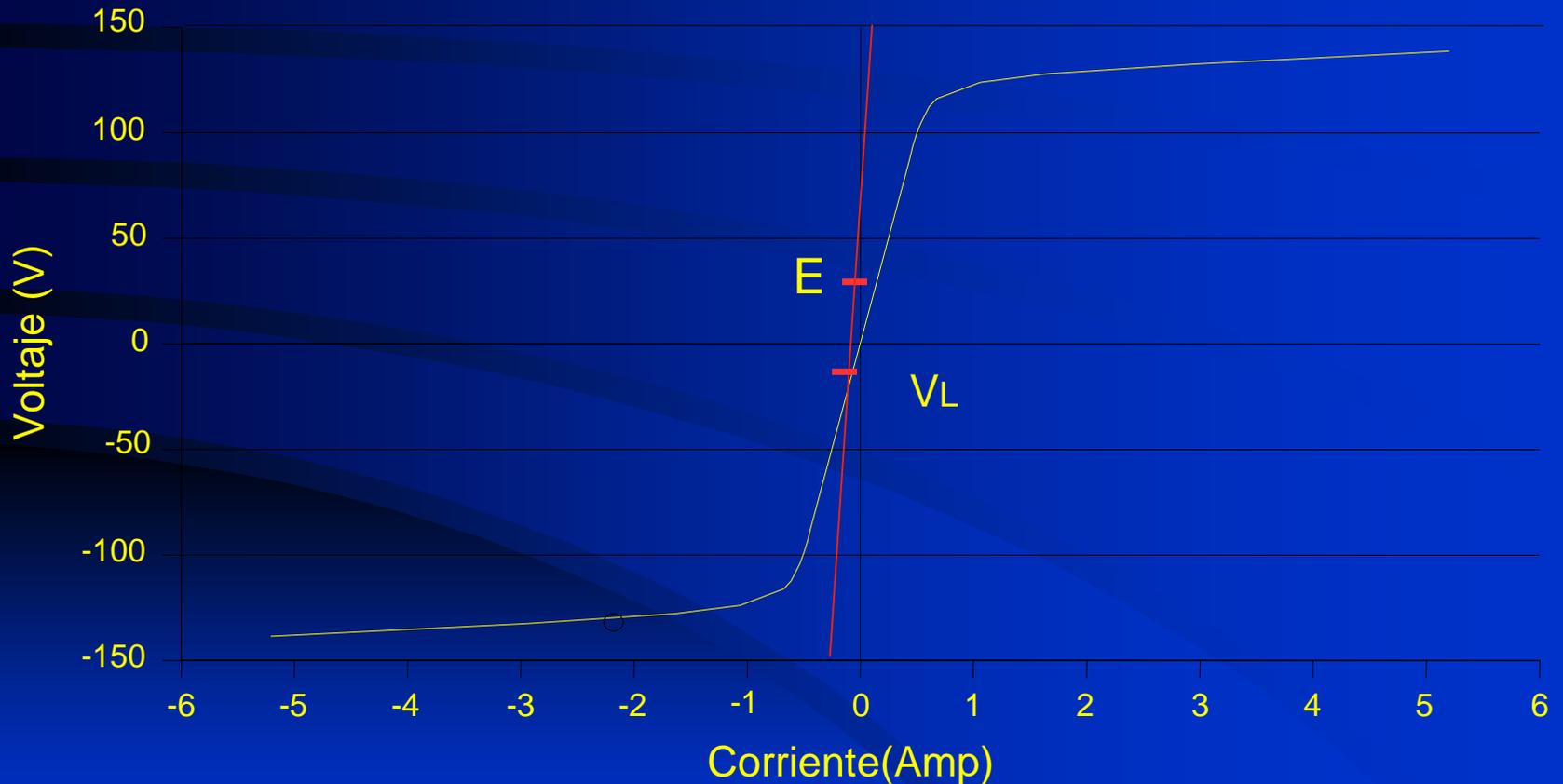
- Las ecuaciones que describen el sistema son:
- $R=0$
- $E = V_L + V_C$
- $V_C = -j1/\omega C \cdot I$
- $V_L = E + j I/\omega C$

# **ANALISIS MATEMÁTICO DE LA FERRORESONANCIA**

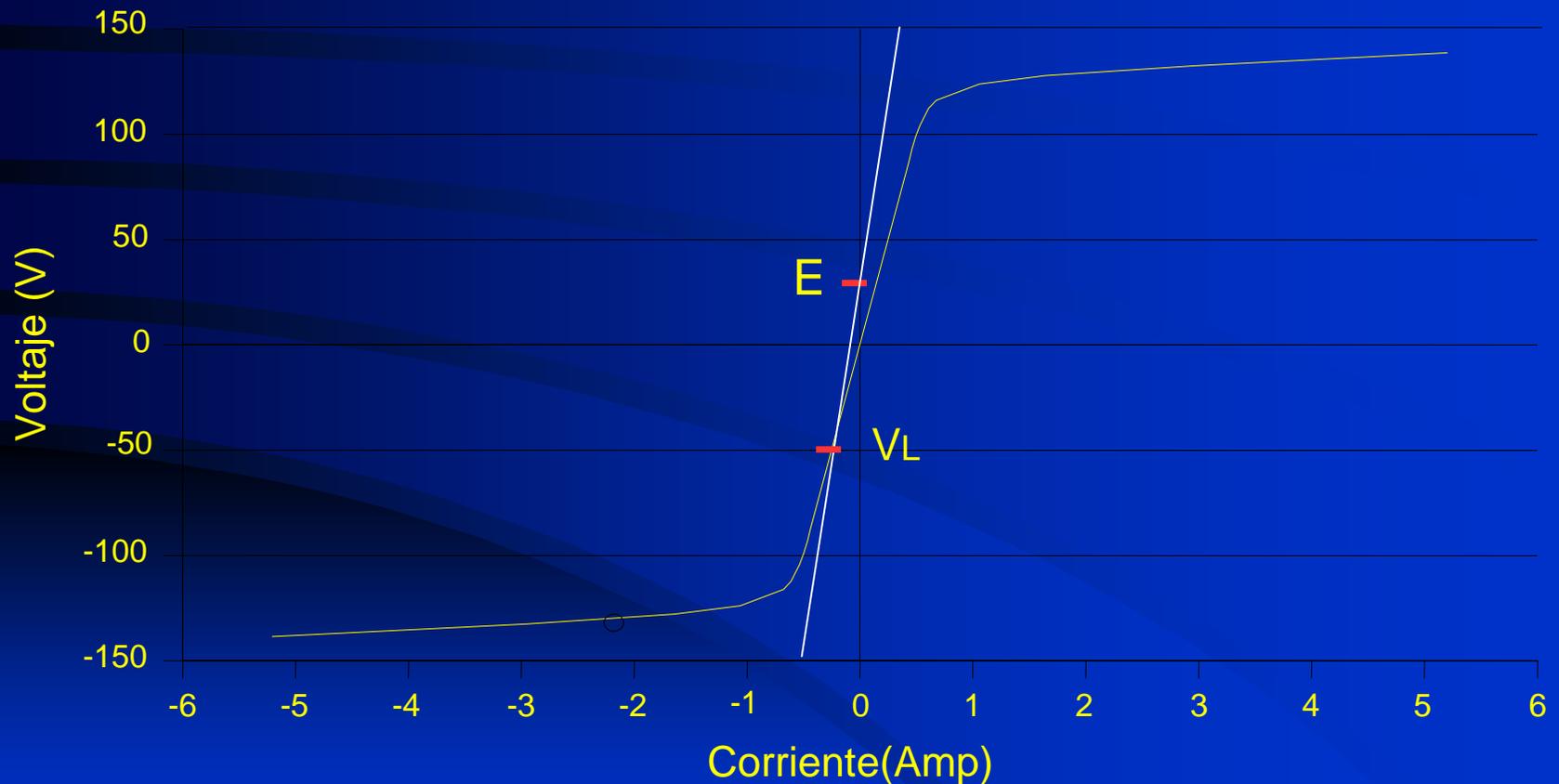
La ecuación  $V_L = E + j I \cdot 1/\omega C$  corresponde a una recta con pendiente  $1/\omega C$ , que corta el eje Y en el punto E.

Como la relación entre el voltaje y la corriente del transformador esta dada igualmente por la curva de magnetización, entonces el punto de operación corresponderá a su intersección con la recta anterior.

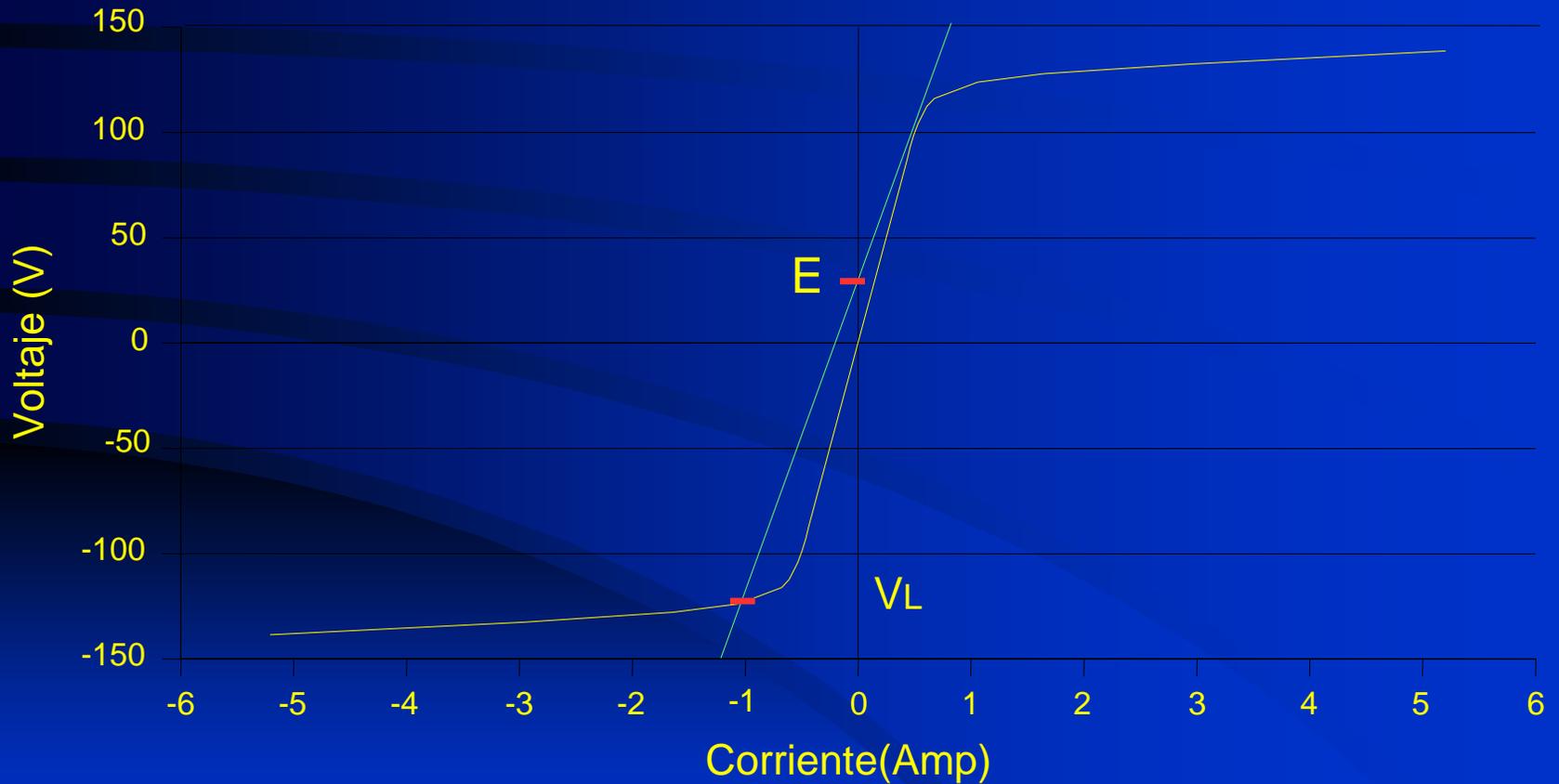
# ***CURVA DE MAGNETIZACION Y RECTA $V = E + I X_c$ (C muy pequeña)***



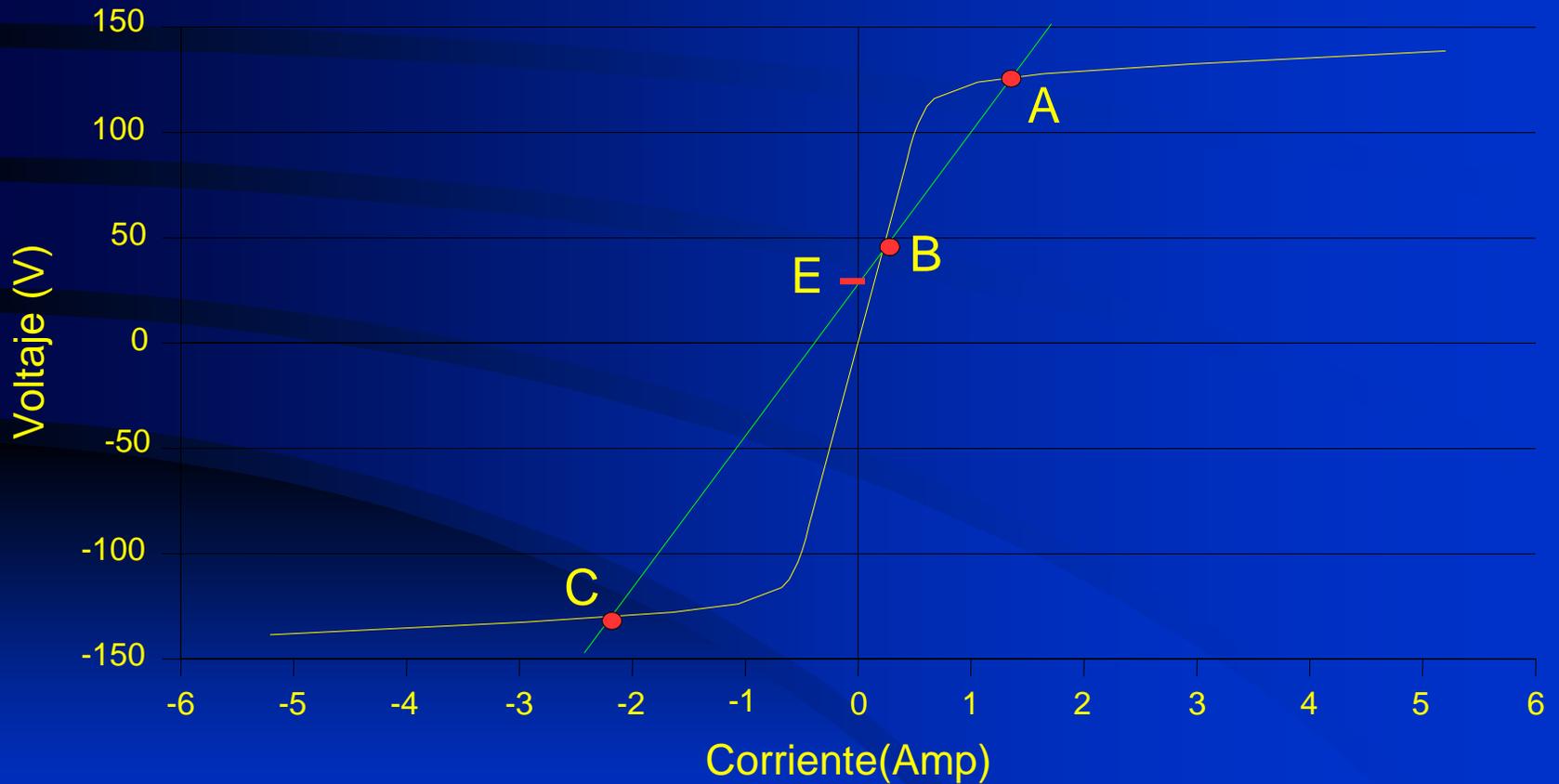
**SI  $X_c$  AUMENTA DISMINUYE, LA PENDIENTE ES MENOR y  $V_L$  ES MAS ALTO**



# CON C MAYOR ( $X_c$ menor)



# CONDICION DE POSIBLE FERRORESONANCIA



# ***ANALISIS DE LA FERRORESONANCIA***

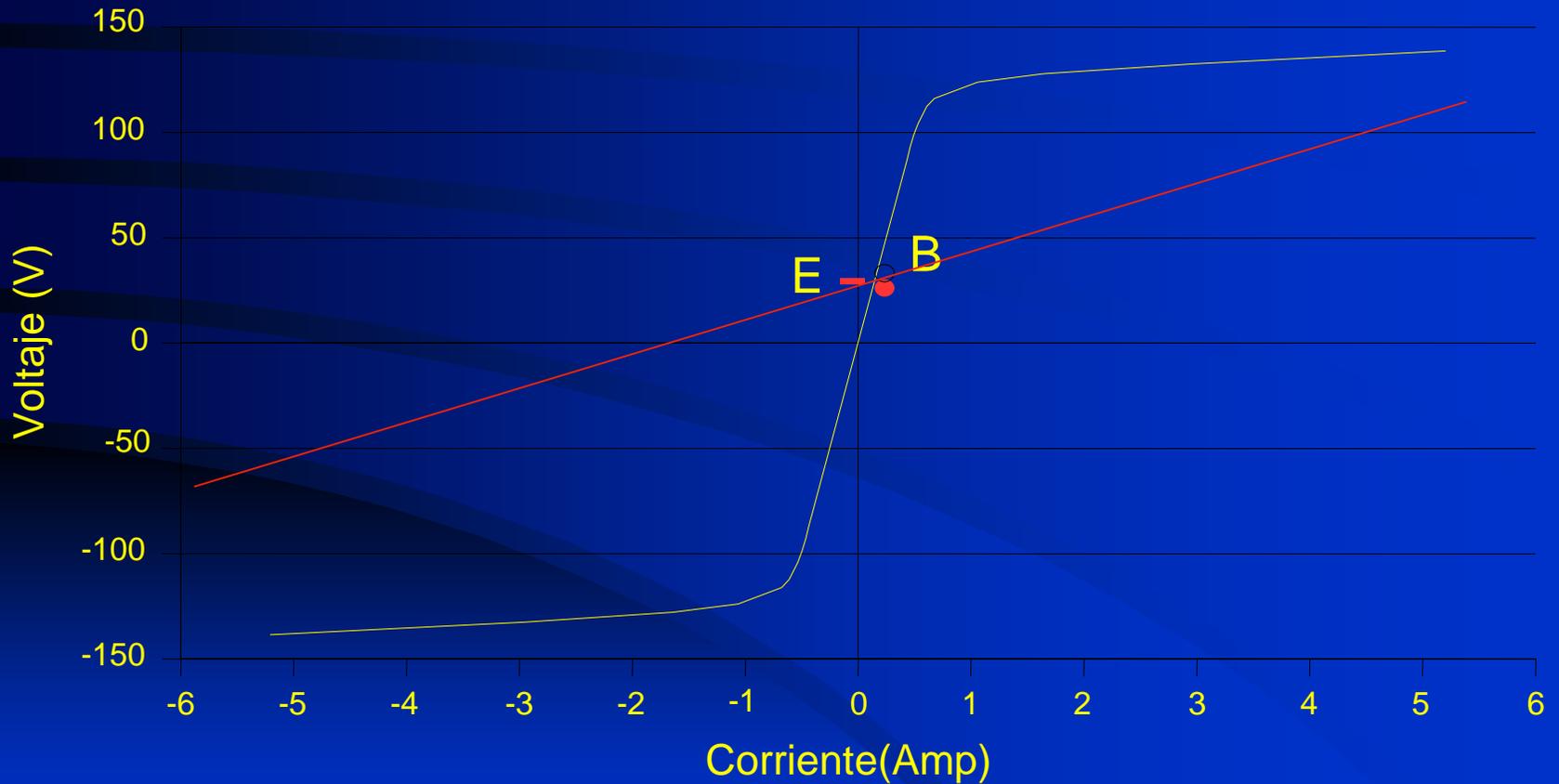
En la figura se observa que existen tres intersecciones que corresponden a los posibles puntos de operación del transformador. Los puntos **B** y **C** son puntos estables de operación, mientras que el punto **A** es inestable.

# ***ANALISIS DE LA FERRORESONANCIA***

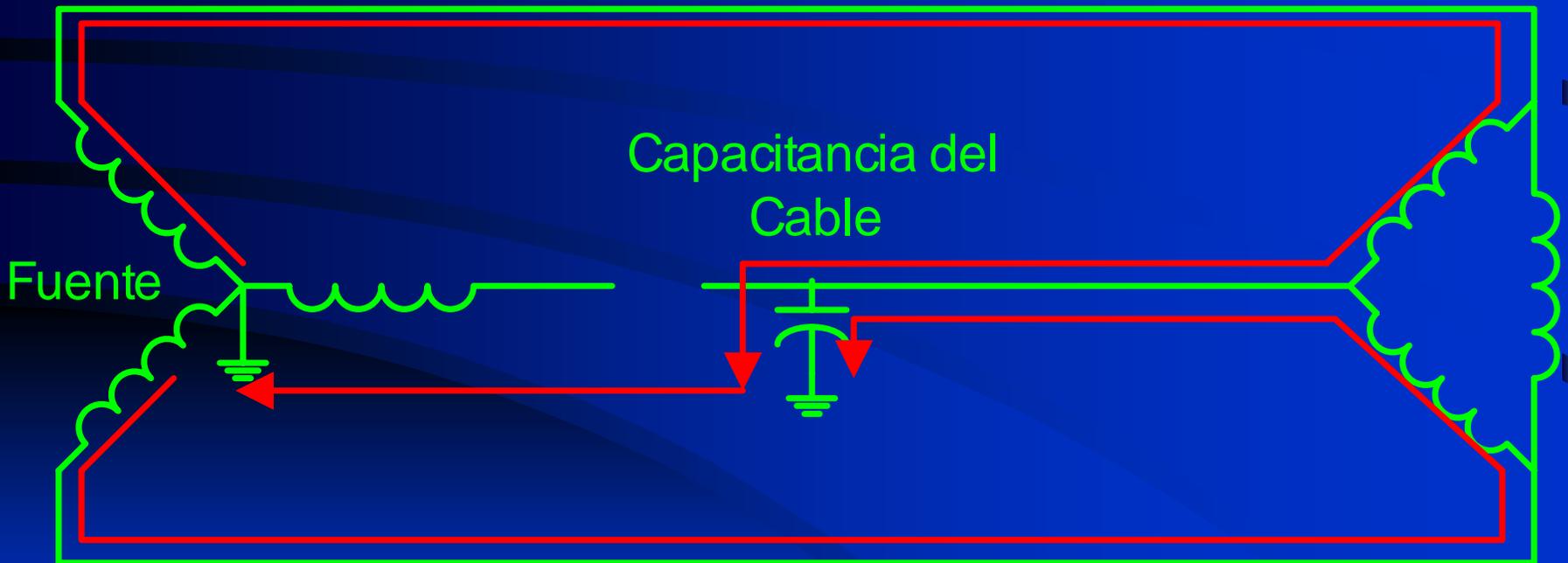
El punto **B** el voltaje  $V_L$  será pequeño y en **C** puede ser elevados, este punto corresponderá a ferroresonancia.

Si entra en ferroresonancia tanto  $V_L$  como  $V_c$  pueden tener valores altos, el sistema puede estar pasando del punto **B** al **C** y viceversa.

# CONDICION CON C MUY GRANDE, AHORA $X_m$ ES MUCO MAYOR QUE $X_c$



# TRANSFORMADOR TRIFASICO CON DOS FASES ENERGIZADAS

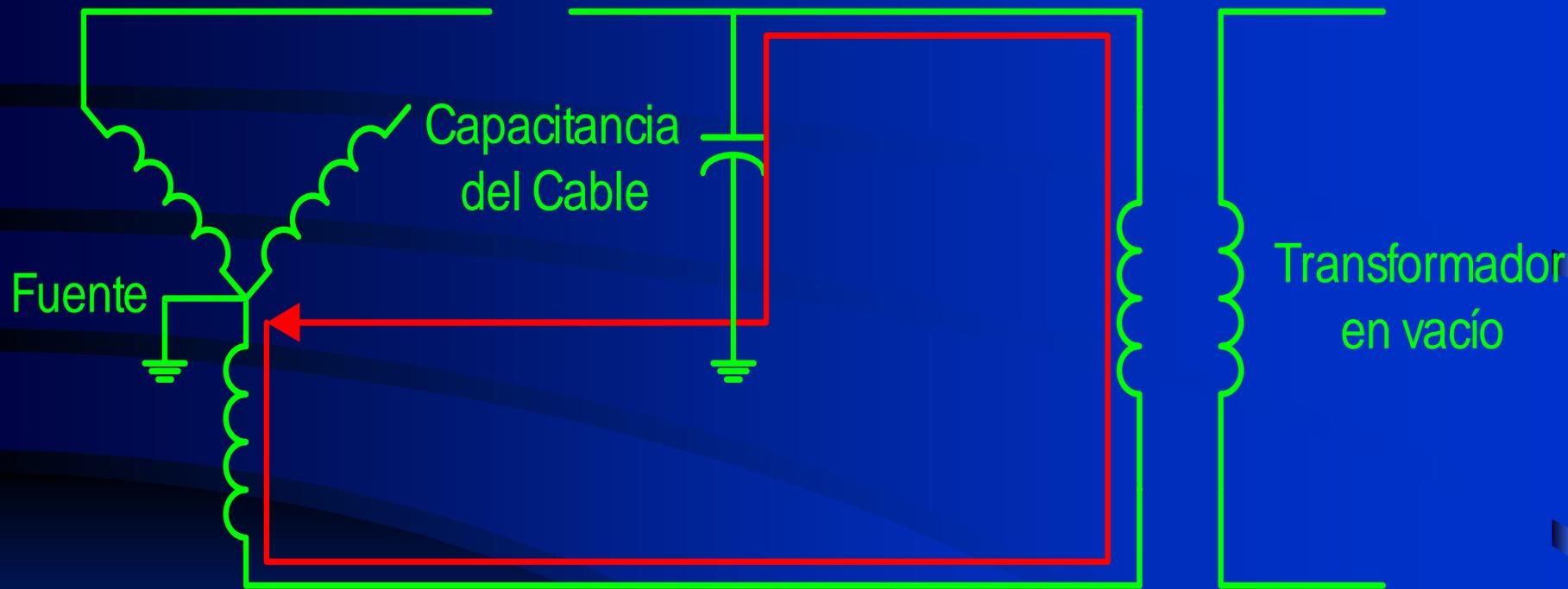


# ***EFFECTOS DE LA FERRORESONANCIA***

- Altos voltajes con picos que pueden exceder varias veces las condiciones normales.
- Excesivo ruido audible en el transformador.
- Formas de onda de  $V$  e  $I$  extremadamente irregulares.

## ***CASO DE FERRORESONANCIA No. 1***

Un transformador monofásico de 250 KVA, 13.2 kV/220-110 V conectado a un sistema de 13.2 kV mediante un cable de 15 kV, de 150 metros de longitud, con capacitancia de  $2.5 \cdot 10^{-7}$  F/Km y con corriente de magnetización del 1 %.



## CASO DE FERRORESONANCIA No. 1

$$I_m = \frac{250}{13.2} = 18.93 \text{ A}$$

$$I_m = \frac{18.93}{100} = 0.1893 \text{ A}$$

$$Z_T = \frac{13.2 \times 10^3}{18.93} = 697 \Omega$$

## CASO DE FERRORESONANCIA No. 1

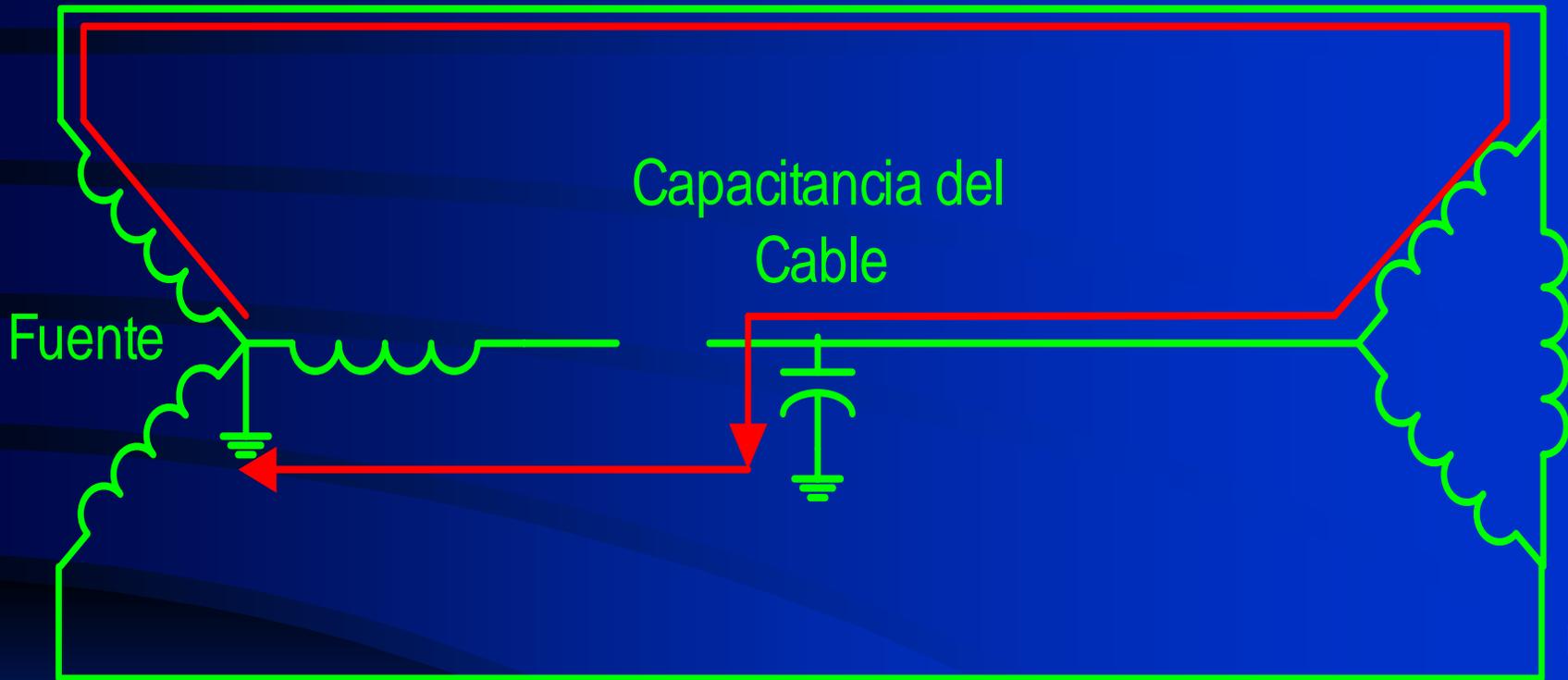
$$Z_m = \frac{13.2 \times 10^3}{18.93 \times 10^{-2}} = 69700 \Omega$$

$$X_m = \frac{10^5 (13.2)^2}{1 * 250} = 69700 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{377 \times 150 \times 250 \times 10^{-12}} = 70733 \Omega$$

## ***CASO DE FERRORESONANCIA No. 2***

Dos transformadores trifásicos de 250 KVA y 300 KVA, 34.5 KV/ 228 V, con lo del 2.5 %, se conectan al sistema de potencia mediante un cable XLPE 35 kV., de 150 metros de longitud, con capacitancia de 132 nF/Km.



## CASO DE FERRORESONANCIA No. 2

$$I_n = \frac{525}{34.5\sqrt{3}} = 8.97$$

$$I_o = 8.7 * 0.025 = 0.2196 A$$

$$X_L = \frac{34500 \sqrt{3}}{0.2196} = 90.7 K\Omega$$

$$C = 132 nF / Km * 0.150 Km = 19.8 nF$$

$$X_C = \frac{1}{377 \times 19.8 nF} = 134 K\Omega$$

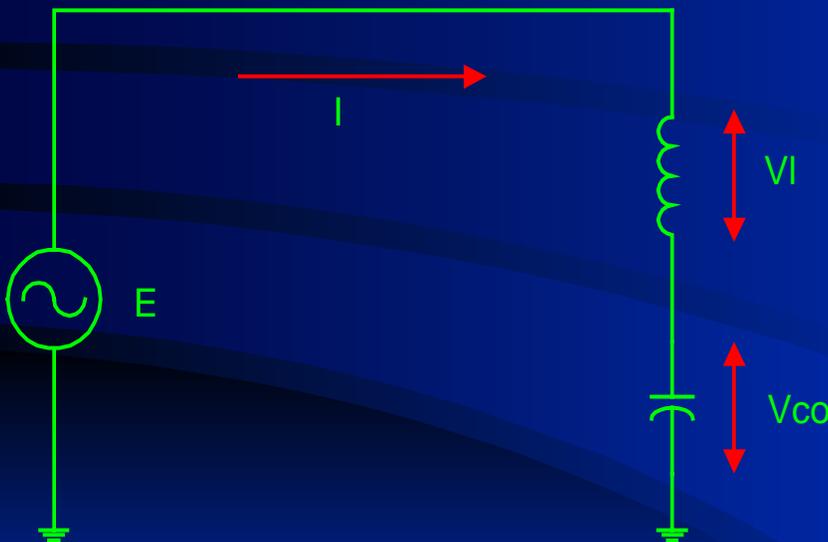
## CASO DE FERRORESONANCIA No. 2

$$Z_T = jX_L - jX_C = j90.7 - j134 = -j44\text{K}\Omega$$

$$I = \frac{34500 \sqrt{3}}{-j44\text{K}\Omega} = +j0.452\text{A}$$

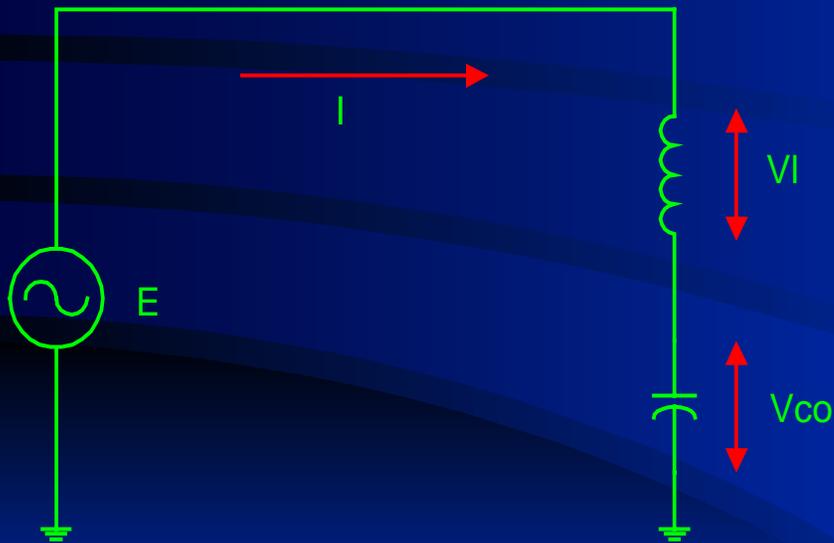
$$V_C = j0.452 * (-j134\text{K}\Omega) = 60.5\text{KV}$$

$$V_L = j0.452 * (j90\text{K}\Omega) = -40\text{KVL}$$



## ***CONDICIONES MODIFICADAS***

1. Que ocurriria si se disminuye la longitud del cable a la mitad.
2. Que si se aumenta 2 o 4 veces.



Con longitud de la mitad:

$$V_C = 30 \text{ kV}$$

$$V_L = -10.1 \text{ kV}$$

Con longitud de 2 veces:

$$V_C = -77 \text{ kV}$$

$$V_L = 57 \text{ kV}$$

Con longitud de 4 veces:

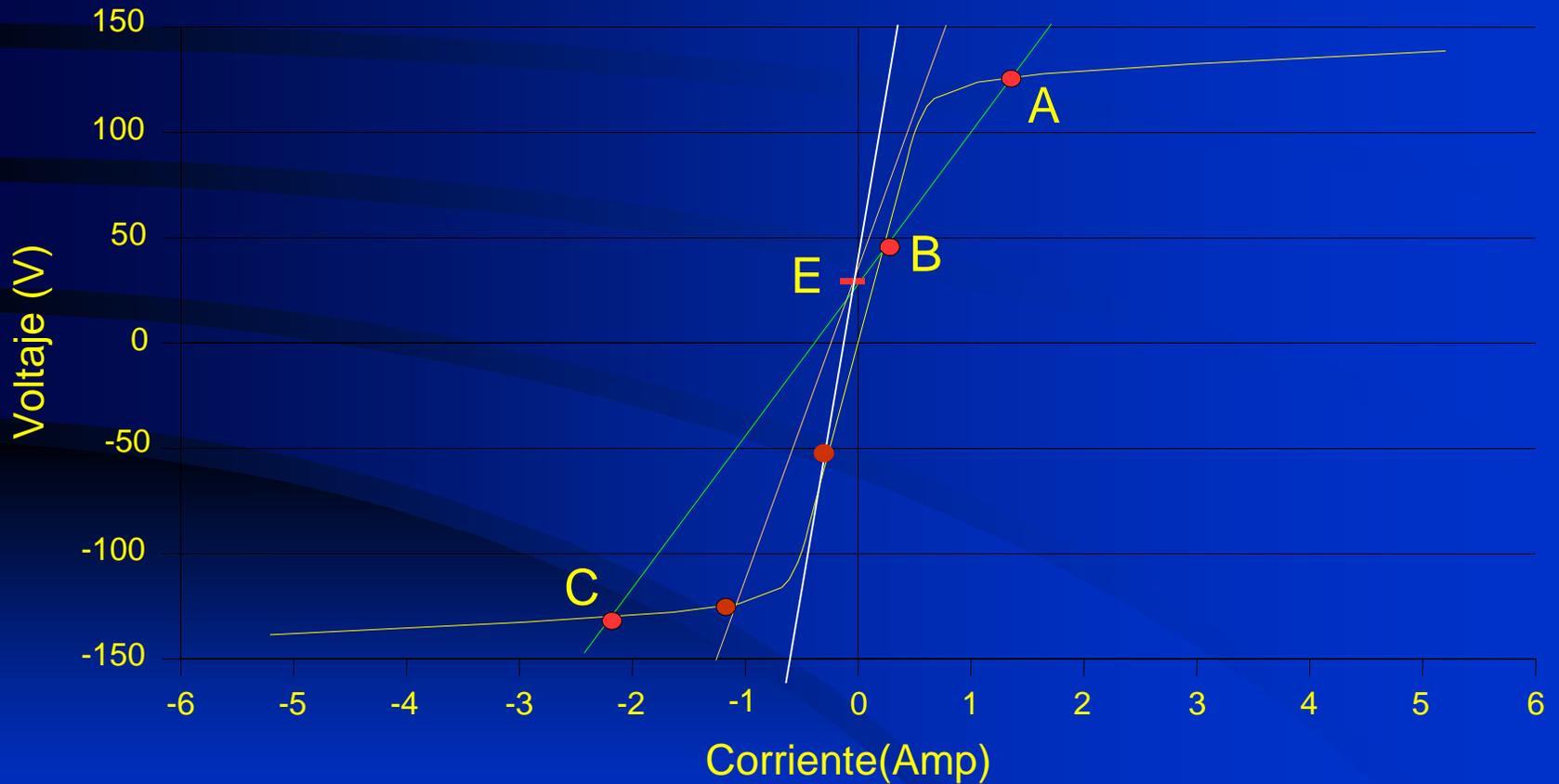
$$V_C = -11.8 \text{ kV}$$

$$V_L = 30.1 \text{ kV}$$

## ***LA FERRORESONANCIA CON CABLES***

Si se aumenta la capacitancia (incrementando la longitud del cable), disminuye  $X_c$  y la pendiente de la recta, pudiendo alcanzar un valor que se define como capacitancia crítica, donde aparecen los puntos **A** y **B** que se agregan al que antes era el único punto de operación **C**

# EFEECTO DEL AUMENTO DE LA CAPACITANCIA



## ***POSIBILIDAD DE LA FERRORESONANCIA***

Si la relación  $X_c/X_m$  es muy elevada no se tienen problemas de resonancia; pero si esta relación se reduce, por aumento de  $C$  o por disminución de  $X_m$ , se puede presentar la ferroresonancia.

# ***LA FERRORESONANCIA EN CABLES***

Existe entonces un valor mínimo ***K*** que relaciona la máxima reactancia capacitiva del cable con la mínima reactancia inductiva del transformador

$$***K*** = Xc/Xm$$

## ***PREVENCION DE LA FERRORESONANCIA***

Quando se emplean cables la medida principal para evitar la ferroresonancia, consiste en limitar la longitud de la acometida para que no se alcance el valor de capacitancia critica. La longitud crítica, se define entonces como la mayor longitud de la acometida (cable) que puede utilizarse en la conexión del transformador, sin que se tenga el riesgo de ferroresonancia.

# ***LONGITUD CRÍTICA***

Longitud crítica es el máximo valor de la acometida (cable) que puede utilizarse en la conexión de transformadores sin que se tenga el riesgo de sobrevoltajes por Ferroresonancia.

## ***POSIBILIDAD DE LA FERRORESONANCIA***

$$X_c = 10^6 / 2\pi f C l$$

- $f$  = Frecuencia nominal
- $C$  = Capacitancia por unidad de longitud
- $l$  = Longitud del cable

## POSIBILIDAD DE LA FERRORESONANCIA

$$X_m = kV^2 / I_{exc\%} * kVA$$

- $I_{exc}$  = Corriente de magnetización
- $kV$  = Voltaje nominal
- $kVA$  = Potencia nominal

# ***ESTIMACIÓN DE LA LONGITUD CRÍTICA***

La longitud crítica se calcula con la siguiente expresión matemática obtenida de la relación

$$K = X_c / X_m$$

$$l = \left( I_{exc\%} * kVA / K * 2\pi f C * kV^2 \right)$$

## **VALOR DE LA CONSTANTE $K$**

En la literatura se encuentran valores de  $K$  del orden de 40. Estos valores no son aplicables para los transformadores de distribución alimentados por cable, ya que aun para un transformador de 400 kVA, la máxima longitud permitida seria menor a 10 metros

## ***DETERMINACION DE LA CONSTANTE K***

Se planteo entonces la necesidad de encontrar un valor de  $K$  apropiado para los transformadores de distribución y que permitiera calcular la longitud critica de los cables.

Para esto se desarrolló un trabajo de laboratorio con transformadores de distribución de tamaños típicamente usados en Colombia.

# TRANSFORMADORES BAJO ESTUDIO

Potencia(kVA)	Fabricante	Volt (kV)	#fases	R1(Ωm)	R2(Ωm)	Po(W)	Io(%)	Ubc(V)	Pcc(W)
10	M	132/024	1	159,080	0,039	604	20	5485	157,1
15	M	132/024	1	64,535	0,018	684	1,2	3260	1554
25	M	132/024	1	36,572	0,008	922	0,9	3628	2225
25	S	132/024	1	27,532	0,010	1049	0,8	3589	2249
75	S	132/024	3	20,914	0,008	2541	0,5	3999	8728
1125	M	132/024	3	17,2100	0,0040	3721	0,5	281,3	1337,0

# PRUEBAS DE LABORATORIO

- Inicialmente se realizaron pruebas por el lado de alta tensión del transformador en conjunto con cable monopolar 15 kV XLPE calibre 2.



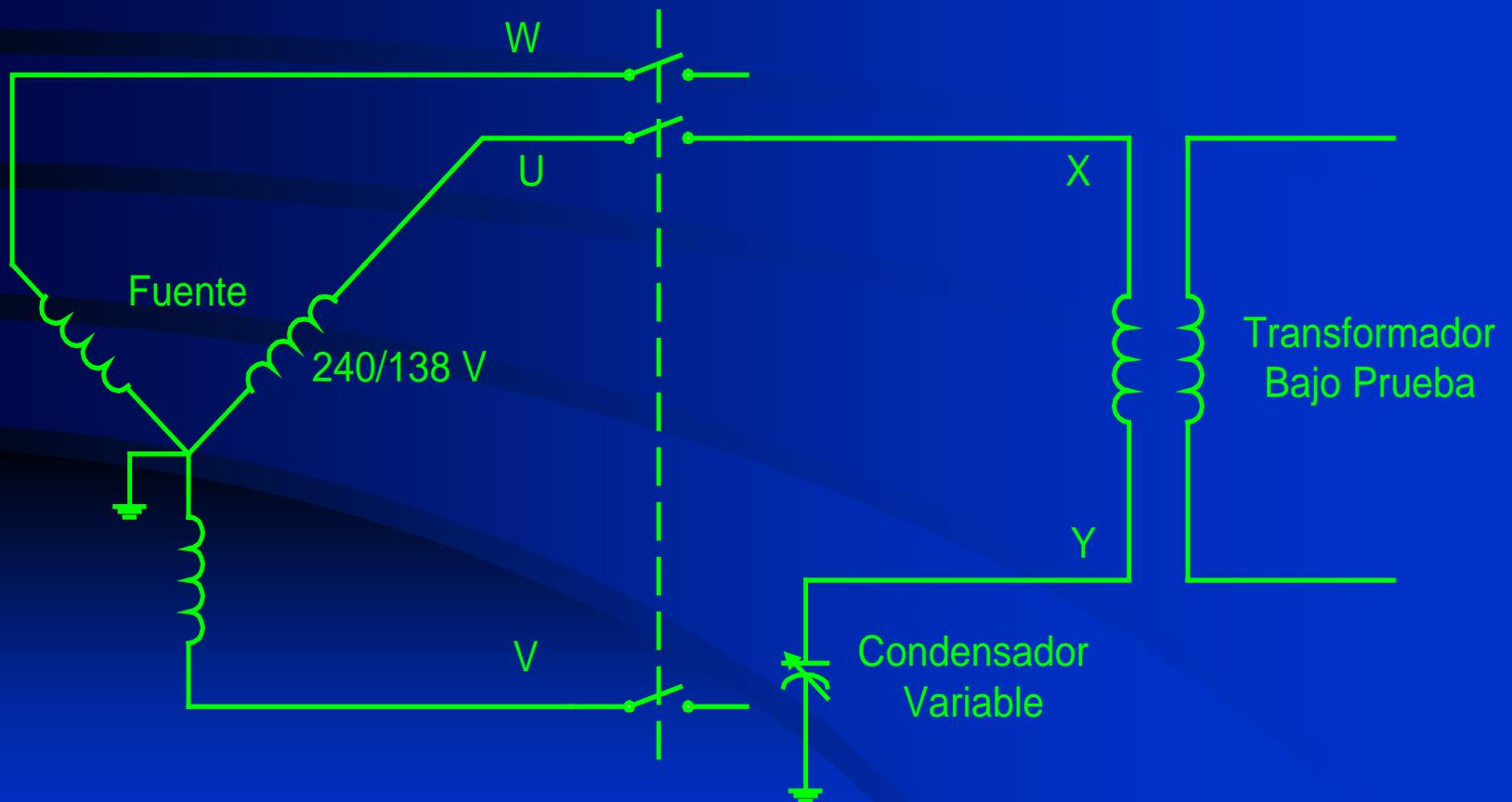
# PRUEBAS DE LABORATORIO



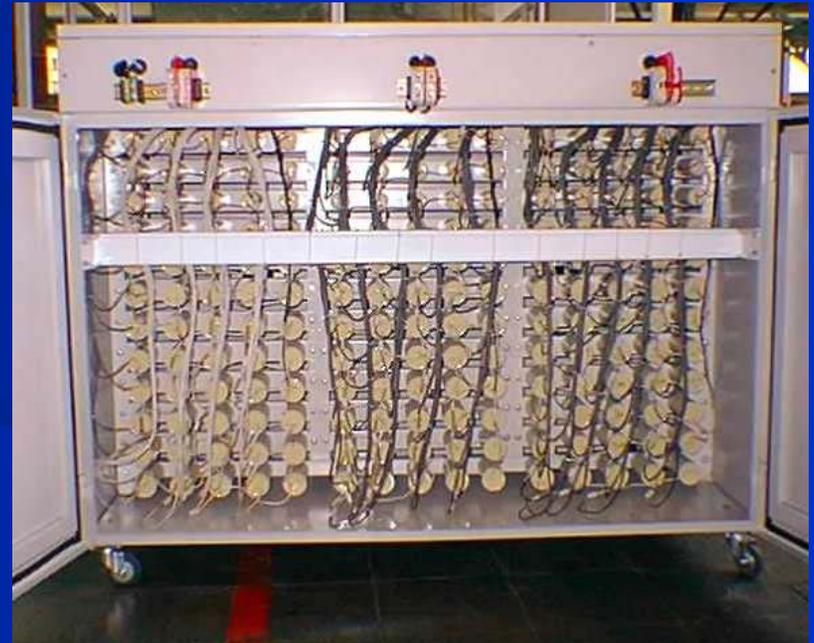
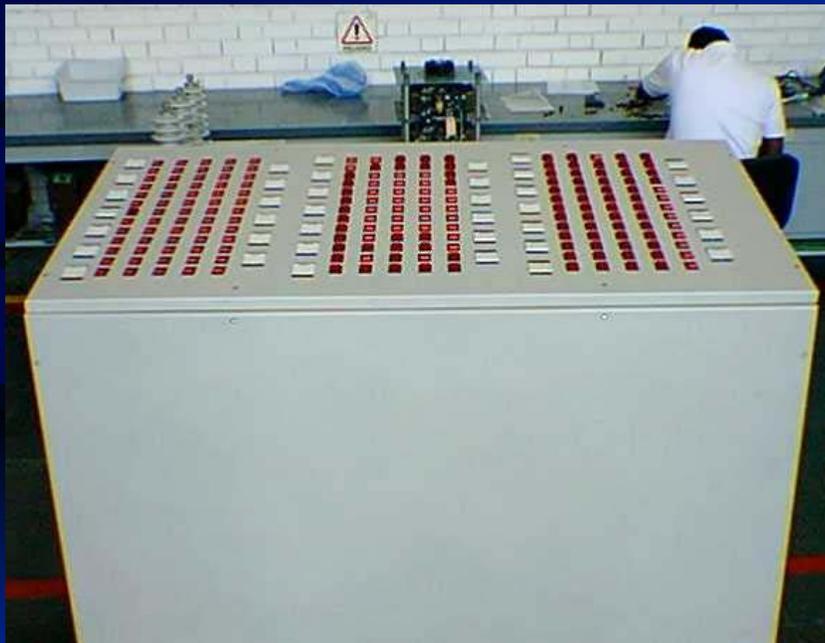
## ***PRUEBAS DE LABORATORIO***

Después de analizar el fenómeno se decidió realizar las pruebas por el lado de baja tensión empleando un banco capacitores, debido principalmente a la seguridad, comodidad y al nivel de tensión manejado.

# PRUEBAS DE LABORATORIO ( CIRCUITO POR BAJA TENSIÓN )



# ***PRUEBAS DE LABORATORIO (MONTAJE)***



# PRUEBAS DE LABORATORIO (MONTAJE)



# ***PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS DE LABORATORIO***

Se alimento con el voltaje nominal y la capacitancia fue ajustada en diversos valores, tomando medidas de voltaje en terminales del banco y en el transformador.

# ***PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS DE LABORATORIO***

Para cada valor de capacitancia se realizaron varias energizaciones aleatorias y se midió el valor pico de la tensión en terminales de la capacitancia.

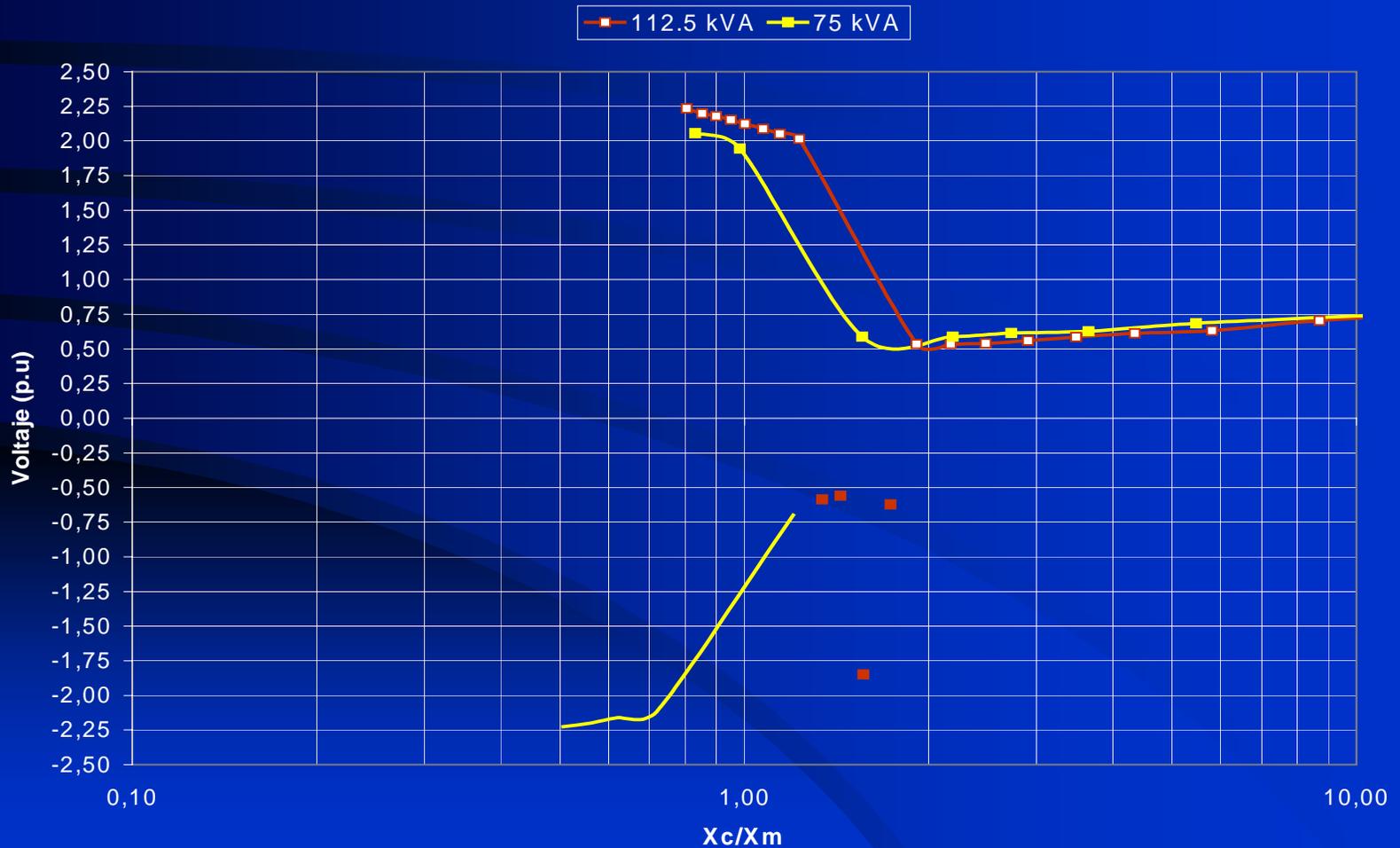
# PRUEBAS DE LABORATORIO

Voltaje Capacitor



# PRUEBAS DE LABORATORIO

Voltaje en Terminales en Banco de Capacitores



# ***ESTIMACIÓN DE LA CONDICION CRÍTICA***

Teniendo en cuenta que el voltaje en los terminales del cable se debe limitar a 1.25 p.u, para evitar daño de los pararrayos, y teniendo en cuenta el numero de muestras, se llegó a que la constante ***K*** debe ser mayor o igual a 2.5 para transformadores monofásicos y a 2.0 para transformadores trifásicos.

# ***ESTIMACIÓN DE LA LONGITUD CRÍTICA***

Con el valor encontrado de  $K$ , se estimó la longitud crítica de cable para los transformadores del proyecto y para los transformadores monofásicos y trifásicos, con las corrientes de excitación definidas en la NTC 818 y con las corrientes de excitación con que típicamente son fabricados en Colombia

***Máxima longitud Permisible de Cable  
Monopolar 15 kV XLPE Calibre 2/0 para  
Transformadores Monofásicos del Proyecto***

<b>Potencia</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Io (%)</b>	<b>Longitud</b>
10,00	13,20	1,96	9,32
15,00	13,20	1,20	8,56
25,00	13,20	0,85	10,11
25,00	13,20	0,83	9,87

***Máxima longitud Permisible de Cable  
Monopolar 15 kV XLPE Calibre 2/0 para  
Transformadores Trifásicos del Proyecto***

<b>Potencia</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Io (%)</b>	<b>Longitud</b>
75,00	13,20	0,51	22,75
112,50	13,20	0,54	36,13

***Máxima longitud Permisible de Cable  
Monopolar 15 kV XLPE Calibre 2/0 para  
Transformadores de Distribución  
Monofásicos ( Iexc norma NTC 818)***

<b>Potencia</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>I<sub>o</sub> (%)</b>	<b>Longitud</b>
10,00	13,20	2,50	11,89
15,00	13,20	2,40	17,13
25,00	13,20	2,00	23,79
37,50	13,20	2,00	35,68
50,00	13,20	1,90	45,19
75,00	13,20	1,70	60,66

***Máxima longitud Permisible de Cable  
Monopolar 15 kV XLPE Calibre 2/0 para  
Transformadores Monofásicos típicos***

<b>Potencia</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Io (%)</b>	<b>Longitud</b>
10,00	13,20	0,59	2,81
15,00	13,20	0,94	6,71
25,00	13,20	0,70	8,33
37,50	13,20	0,50	8,92
50,00	13,20	0,44	10,47
75,00	13,20	0,54	19,27

***Máxima longitud Permisible de Cable  
Monopolar 15 kV XLPE Calibre 2/0 para  
Transformadores de Distribución Trifásicos  
(lexc norma NTC 818)***

<b>Potencia</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Io (%)</b>	<b>Longitud</b>
15,0	13,2	4,4	39,25
30,0	13,2	3,6	64,22
45,0	13,2	3,5	93,66
75,0	13,2	3,0	133,80
112,5	13,2	2,6	173,94
150,0	13,2	2,4	214,08
225,0	13,2	2,1	280,98
300,0	13,2	2,0	356,80
400,0	13,2	1,9	451,94

# ***Máxima longitud Permisible de Cable Monopolar 15 kV XLPE Calibre 2/0 para Transformadores Trifásicos típicos***

<b>Potencia</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Io (%)</b>	<b>Longitud</b>
15,0	13,2	0,6	5,71
30,0	13,2	0,8	13,38
45,0	13,2	0,5	12,04
75,0	13,2	0,7	29,44
112,5	13,2	0,6	37,46
150,0	13,2	0,5	40,14
225,0	13,2	0,4	57,53
300,0	13,2	0,3	48,17
400,0	13,2	0,3	71,36

## ***CASO DE CIRCUITO AEREO***

Transformador de 19100 V, 50 kVA, con 1.9% de lo. Calcular con una relacion  $X_c/X_m$  mayor o igual a 10 o menor o igual a 0.1

Conectado con conductor desnudo ACSR con 3.2 nF/km

L mayor de 21.6 km  
*L menor de 216m*

*Con el conductor corto*

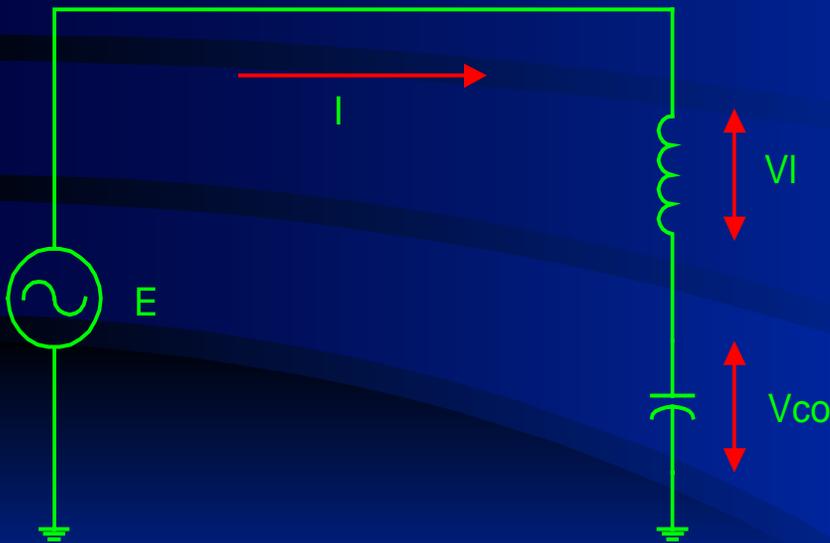
$$V_L = -2.1 \text{ kV}$$

$$V_C = 21.2 \text{ kV}$$

*Con el largo*

$$V_L = 21 \text{ kV}$$

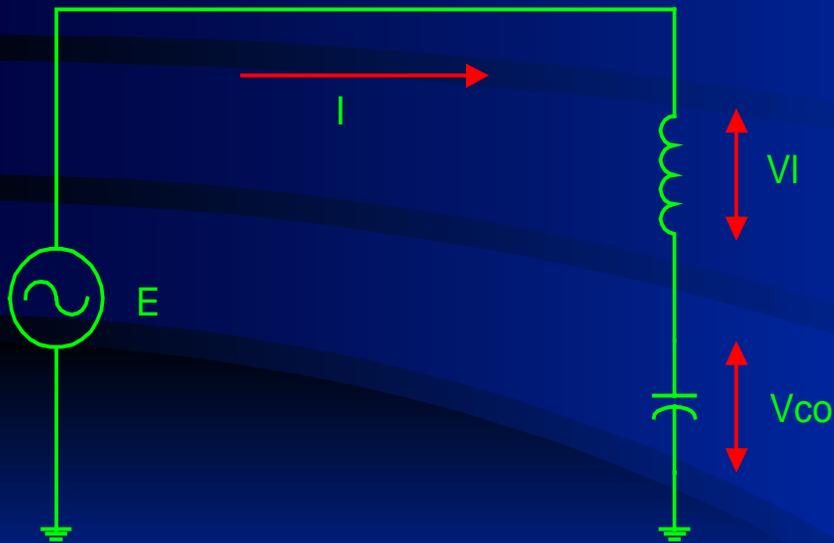
$$V_C = -2.1 \text{ kV}$$



## ***CASO DE CIRCUITO AEREO***

Transformador de 19100 V, 50 kVA,  
con 0.6% de lo

Conectado con conductor ACSR con 3.2  
nF/km

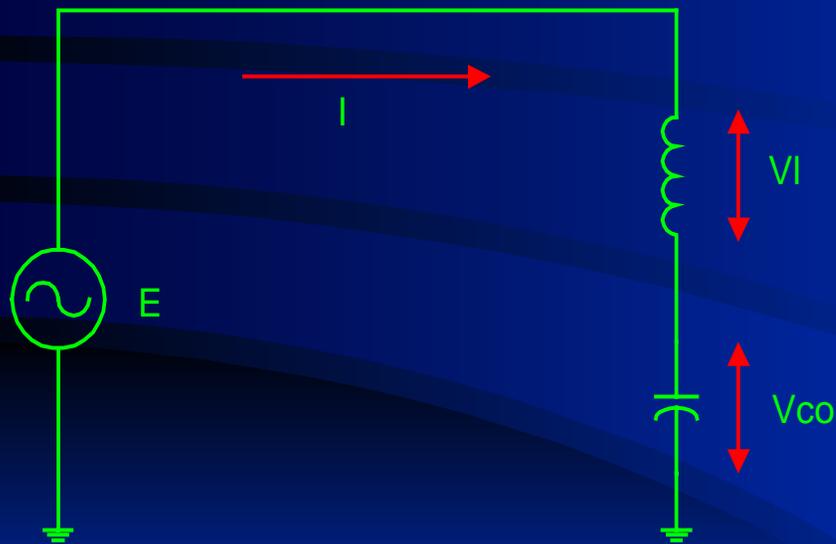


$L$  mayor de 2.13 km  
 $L$  menor de 21m

# ***CASO DE CIRCUITO AEREO***

Transformador de 19100 V, 50 kVA,  
con 1.9% de lo

Conectado con conductor desnudo  
ACSR con 10 nF/km



L mayor de 6.76 km  
*L menor de 67m*

# **COMENTARIOS**

De los resultados mostrados se puede afirmar que hay riesgo de que se presente la ferresonancia al conectar transformadores monofásicos y trifásicos de potencias bajas.

# COMENTARIOS

Para que se presente la ferresonancia se requiere:

- Existencia de un circuito LC
- Ausencia de carga o presencia de una muy baja.
- Existencia de puntos sin potencial fijo: neutros aislados, aperturas monofásicas, fusibles de operación monopolar etc.

# ***EFECTOS***

La ferresonancia puede ocasionar:

- Quema de los pararrayos
- Ruido y calentamiento del transformador
- Disparo del circuito
- Daño en cables y capacitores
- Quema del transformador

# ***MEDIDAS REMEDIALES***

- Para mitigar la ferresonancia se pueden conectar resistencias de carga en el lado secundario del transformador, cuando este vaya a ser energizado.
- Otra solución es la realización de operaciones de maniobra utilizando seccionadores tripolares.

# ***MEDIDAS REMEDIALES***

- Deben evitarse algunos tipos de maniobras
- No emplear algunos tipos de configuraciones
- Evaluar la magnitud de los parametros del sistema
- No tratar de sobredimensionar aislamientos o pararrayos

# ***MEDIDAS REMEDIALES***

Cuando la longitud de la acometida exceda la longitud marginal, y se utilicen seccionadores monopolares, estos deben colocarse en el punto del transformador y no en el punto del alimentador.

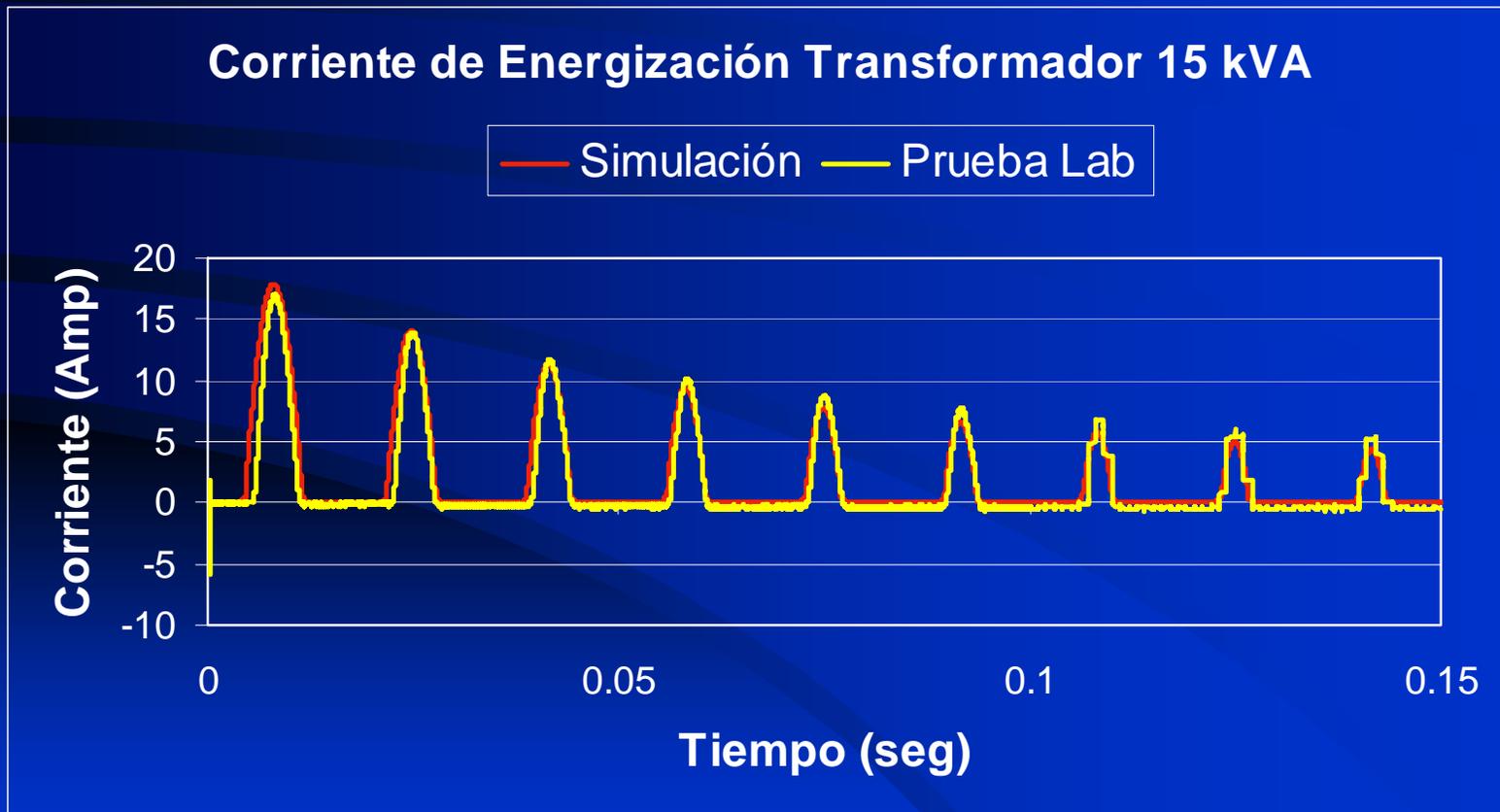
## **COMENTARIOS**

Debido a que los transformadores de distribución tipo pedestal siempre son conectados utilizando cable monopolar, estando sujetos a la posible ocurrencia de ferresonancia, se recomienda que su corriente de excitación y pérdidas de vacío sean mayores que la de los transformadores tipo normal.

# ***MODELAMIENTO UTILIZANDO EMTP-ATP***

- Fuente de Voltaje: se usó una fuente ideal de voltaje tipo 14.
- Capacitancia: Se representó como un elemento concentrado, o haciendo uso de la subrutina CABLE CONSTANTS.
- Transformador: se emplearon las subrutinas BCTRAN y SATURA

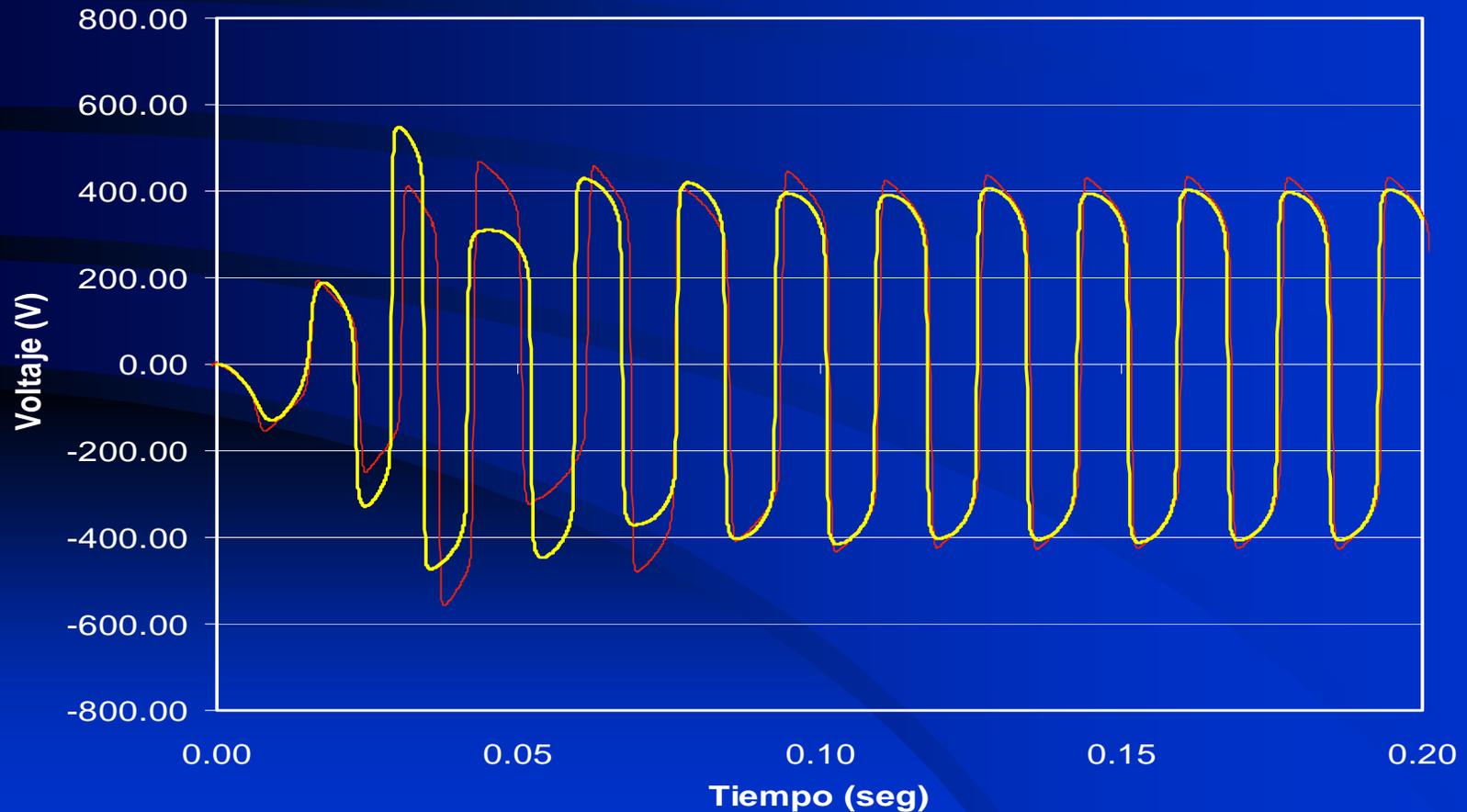
# VERIFICACION DEL MODELAMIENTO CONTRA PRUEBAS DE LABORATORIO



# RESULTADOS OBTENIDOS

Voltaje Terminales Condensador 30.9 uF. Transformador 25 kVA

— Prueba Laboratorio — Simulación



# ***AGRADECIMIENTOS***

La Universidad del Valle agradece a  
COLCIENCIAS e INDUSTRIAS  
ELECTROMECAICAS MAGNETRON  
S.A por el financiamiento del  
proyecto de donde se tomaron los  
resultados presentados.



[www.gralta.univalle.edu.co](http://www.gralta.univalle.edu.co)

