

Modelado y Análisis del Desempeño No-lineal de un Reactor en Derivación de 400 kV

Ana A. Moran-Acevedo, Brayan F. Hidalgo-Cruz,
F. P. Espino-Cortés

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación ESIME Zacatenco
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México

Rodrigo Ocón -Valdez

Facultad de Estudios Superiores Aragón
Universidad Nacional Autónoma de México
Estado de México, México
rodrigocon99@aragon.unam.mx

Resumen— Durante el proceso de diseño de un reactor en derivación con núcleo magnético, el contar con su modelo electromagnético permite verificar algunos de sus parámetros más importantes, entre los cuales se pueden mencionar la inductancia saturada y la inductancia no-saturada. En este trabajo, se realiza el cálculo de la inductancia saturada y la no saturada, utilizando el método del elemento finito (MEF), de un reactor monofásico en derivación tipo columna de 25 MVAR y 400 kV. Se utiliza una técnica que permite realizar simulaciones en el dominio de la frecuencia considerando la no linealidad del material del núcleo del reactor. Los valores obtenidos se comparan con los valores medidos en la prueba de linealidad en laboratorio. Adicionalmente, se simula el desempeño del reactor saturable instalado en una línea de transmisión, tanto en estado estable como en condiciones transitorias (apertura de interruptores por maniobra), comparando las sobretensiones con el uso de un reactor no saturable (lineal). Se concluye que es fundamental contar con valores precisos de la curva de linealidad de los reactores para los estudios de sobretensión en las líneas de transmisión, y también que dependiendo de la carga conectada a la línea, el reactor saturable presenta mejor control de la sobretensión por maniobra que un reactor no saturable.

Palabras Clave — Reactor, no-linealidad, línea larga, capacitancia, compensación, sobretensiones.

I. INTRODUCCIÓN

Los reactores en derivación son equipos de suma importancia en la red general de transmisión, estos se encargan de compensar los niveles altos de tensión producidos por la potencia reactiva en líneas de gran longitud. La potencia reactiva generada se debe a la capacitancia presente entre conductores y tierra y depende de la geometría de la línea. En las líneas de transmisión de alta y extra alta tensión, los reactores en derivación desempeñan un papel crucial en la estabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos de potencia [1].

Los reactores en derivación, ya sean conectados entre fases o de fase a tierra, controlan el efecto Ferranti en líneas con poca carga donde el aumento en la tensión en el lado receptor puede tener consecuencias negativas importantes en la estabilidad del sistema eléctrico. El efecto Ferranti debe considerarse en el diseño y la operación de sistemas de transmisión de alta y extra alta tensión, y en caso necesario, establecer si es necesaria la instalación de dispositivos de compensación como los reactores

en derivación, que permitan prevenir o aminorar sus efectos y garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico. Los reactores en derivación también ayudan a amortiguar las sobretensiones dinámicas en la red. El uso de reactores en derivación no solo se limita a la compensación reactiva de líneas de transmisión, sino que también se extiende a la compensación de reactivos en cables subterráneos y submarinos [1].

Los reactores en derivación tipo columna con núcleo radial, ver Figura 1, son equipos utilizados para la compensación reactiva en las líneas de transmisión; estas reactancias son fijas y poseen un núcleo no-lineal. Una reactancia fija se refiere a que la magnitud de la inductancia conectada se establece a un valor fijo en condiciones normales de operación. Este tipo de dispositivo es el más frecuente para la compensación de reactivos y su aplicación es muy común en las líneas de transmisión largas. Debido a que la reactancia es fija, su uso se limita a sistemas donde la carga no sea variable o esta variación es mínima [1].

Un reactor no lineal, como el que se muestra en la Figura 1, se construye con un núcleo magnético con entrehierros que crea un camino de baja reluctancia para el flujo magnético. Los entrehierros se encargan de controlar el valor de la inductancia no saturada y de almacenar la energía. En los reactores en derivación tipo columna, aproximadamente el 80% de la energía magnética se concentra en los entrehierros [2]. el valor de la inductancia dependerá de la curva B-H (curva de saturación del material con el que se fabricó el núcleo, del número y dimensiones de los entrehierros y otros parámetros del diseño.

Debido a la implementación de entrehierros en el núcleo, la curva de linealidad presentará dos zonas: la zona no-saturada (lineal) y la zona saturada (de no linealidad). En la zona de linealidad, el reactor se comporta como un reactor no saturable, pero cuando se alcance el nivel de saturación del núcleo el comportamiento deja de ser lineal. La sección transversal del núcleo, la longitud total del entrehierro y el número de vueltas, tienen una relación directa con la inductancia del reactor. El valor de la inductancia y la tensión aplicada determinan la capacidad de potencia reactiva del reactor [3].

En estos reactores, al incorporar en su diseño un núcleo con entrehierros, se presentan desafíos específicos relacionados con el análisis de su comportamiento electromagnético. Contar con el modelo electromagnético de un reactor en derivación tipo

columna permite comprobar y verificar durante la etapa de diseño la curva I-V (curva de linealidad) del reactor, la inductancia saturada y no saturada, así como el comportamiento de la densidad de flujo y la energía magnética en los entrehierros. Con el modelo electromagnético es posible determinar las características que definen la respuesta de estos elementos ya instalados en la red eléctrica, permitiendo verificar si se comportarán de la manera esperada.

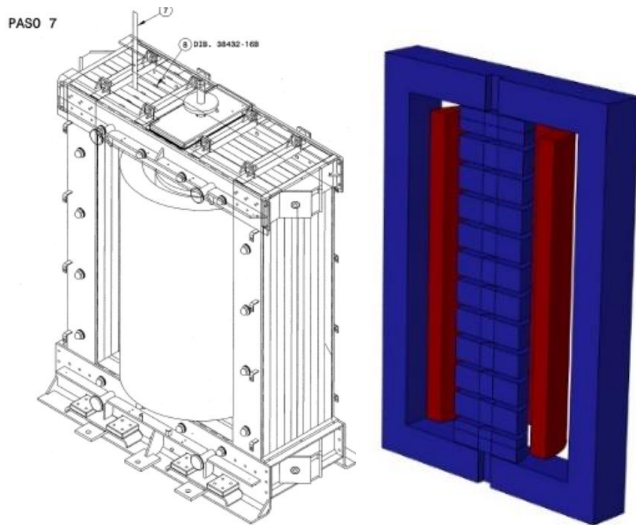


Figura 1. Geometría del núcleo-bobinas (izquierda) y corte transversal de un reactor en derivación tipo columna con núcleo radial donde se observan los entrehierros en la pierna central (derecha)

En este trabajo, inicialmente se describe el modelado electromagnético de un reactor en derivación tipo columna, monofásico de 25 MVar de 400 kV, diseñado para operar en un banco trifásico, ver Figura 2; el modelo se valida comparando los valores calculados de la inductancia saturada y no saturada contra los obtenidos en las pruebas de laboratorio para el reactor. Posteriormente la característica de linealidad calculada se utiliza para realizar un análisis de transitorios electromagnéticos (sobretensiones de estado estable y por maniobra) y comparar su desempeño contra el uso de reactores no saturables (lineales), utilizando un paquete computacional especializado (PSCAD®).

II. MODELADO ELECTROMAGNÉTICO DEL REACTOR EN DERIVACIÓN

El reactor monofásico de 25 MVar en derivación tipo columna con núcleo radial se modeló en el software COMSOL® *Multiphysics*, la tensión de fase es de $400/\sqrt{3}$ kV, el resto de las características se presentan en la Tabla 1.

Tabla I. Características del Reactor monofásico bajo estudio

Valores del sistema		
Tensión de línea:	400	[kV]
Tensión de fase:	230.940	[kV]
Datos nominales del reactor de potencia		
Tipo de reactor:	Columnas	
Potencia nominal:	25	[MVar]
Corriente nominal:	108.253	[A]
Tensión nominal:	230.940	[kV]
Conexión en Banco:	Y	
Fases:	1 \emptyset	
Frecuencia:	60	[Hz]
Reactancia nominal:	2133.333	[Ω]
Inductancia nominal:	5.658	[H]

Los resultados de la prueba de linealidad del reactor en derivación ya construido y obtenidos en el laboratorio se presentan en la Tabla II y en la Figura 3.



Figura 2. Fotografía de un banco trifásico típico de reactores en derivación tipo columna de 75 MVar (25 MVar/fase). Se observan reactores de fase y la reserva.

Tabla II. Resultados de la prueba de linealidad del reactor en derivación

Medición de linealidad		
Valores de Inductancia		
Inductancia no saturada:	5.4473	[H]
Inductancia saturada:	2.6568	[H]

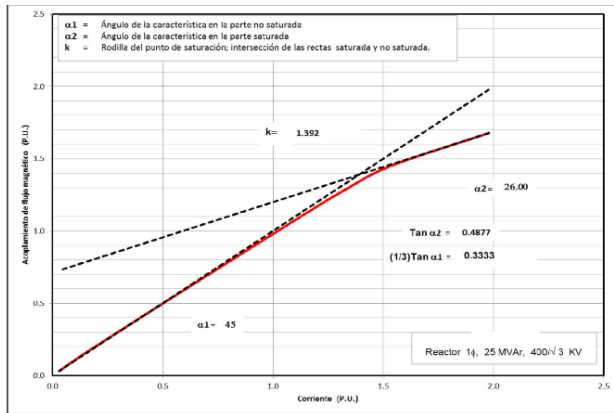


Figura 3. Resultados de la prueba de linealidad del reactor bajo estudio.

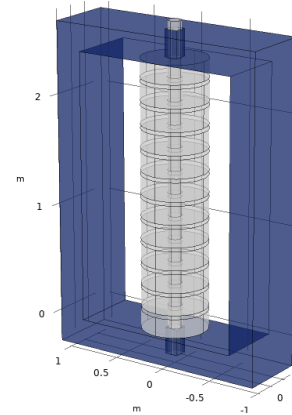


Figura 5. Modelo del núcleo del reactor en derivación

La geometría del reactor está compuesta por una sola bobina y por un núcleo magnético. La pierna central del núcleo está constituida por una columna de acero con entrehierros separados por materiales no magnéticos, como se muestra en la Figura 4.

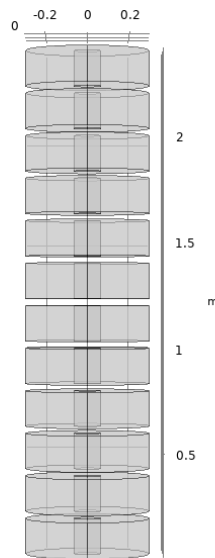


Figura 4. Detalle de la pierna central del núcleo

El ensamble completo del núcleo consiste en colocar la columna en la parte central de una estructura rectangular que funciona como retorno de baja reluctancia para el flujo magnético, Figura 5.

La simulación del reactor se considera como un fenómeno de campos cuasi estacionarios, utilizando la interfaz de Campos Magnéticos en el dominio de la frecuencia de COMSOL®, las ecuaciones a resolver mediante el método del elemento finito son:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \quad (4)$$

donde:

$$\omega = \text{Frecuencia angular} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$\mathbf{H} = \text{Intensidad de campo magnético} \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

$$\mathbf{J} = \text{Densidad de corriente} \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\mathbf{B} = \text{Densidad de flujo magnético} [\text{T}]$$

$$\mathbf{E} = \text{Intensidad de campo eléctrico} \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

$$\mathbf{D} = \text{Densidad de flujo eléctrico} \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\mathbf{A} = \text{Potencial vectorial magnético} \left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}} \right]$$

En la interfaz de campos magnéticos y eléctricos de la versión de COMSOL® utilizada en este trabajo se cuenta con la herramienta COIL o BOBINA, la cual permite simplificar la configuración de modelos electromagnéticos de bobinas y conductores de baja frecuencia. Para las simulaciones en este trabajo, el campo magnético es generado por corrientes eléctricas que fluyen en materiales conductores, por lo que la herramienta COIL es adecuada para definir el modelo de los devanados de manera fácil y para diferentes estructuras, permitiendo traducir cantidades distribuidas (densidades de corriente y campos eléctricos) en cantidades concentradas (corrientes y tensiones).

El problema se puede dividir en dos partes, el cálculo con la relación lineal y el cálculo con la relación no lineal. La relación entre la densidad de flujo magnético y la corriente será lineal para tensiones donde el nivel de densidad de flujo magnético esté muy por debajo del punto de saturación, pero se volverá no lineal a tensiones más altas cuando el flujo empiece a causar saturación. Cuando se aplica una tensión sinusoidal de tal amplitud que la característica magnética es no lineal, la corriente no será sinusoidal, tal como se observa en la Figura 6 [4].

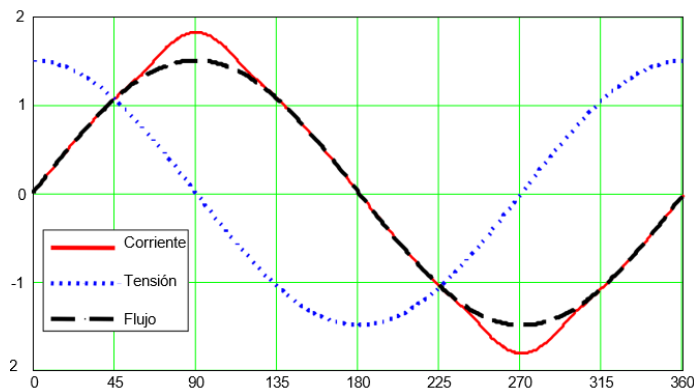


Figura 6. Ilustración de la forma de onda del flujo y corriente con una tensión sinusoidal aplicada a un inductor con una característica no lineal.

La solución cuasi estacionaria en el dominio de la frecuencia, formula las ecuaciones de solución en base a fasores con la frecuencia de análisis (60 Hz). Esto solo es aplicable cuando la relación entre la densidad de flujo magnético y la corriente es lineal, ya que la corriente no tiene armónicos. Pero, cuando el flujo empieza a causar saturación (relación no lineal entre el flujo y la corriente), la corriente no será sinusoidal.

Esto quiere decir que la corriente tendrá armónicos y la solución cuasi estacionaria en el dominio de la frecuencia ya no es adecuada para esta condición, ya que ahora las ecuaciones se deben formular en base al dominio del tiempo. La necesidad de trabajar con un modelo en tres dimensiones, y el comportamiento no lineal del núcleo, demandan una considerable capacidad computacional para la solución de este tipo de problemas cuando son simulados en el dominio del tiempo [4].

Existe una opción para realizar las simulaciones en el dominio de la frecuencia aun cuando el reactor opera en la zona no lineal y es mediante el ajuste de la curva B-H, esta se ajusta a un equivalente que permite incluir el efecto de la no linealidad en las cantidades fasoriales a frecuencia de 60 Hz. Ajustar la curva B-H es una aproximación del comportamiento de un material magnético no lineal en simulaciones en el dominio de la frecuencia como se observa en las Figuras 7 y 8. Este enfoque permite calcular el valor aproximado de la respuesta del material a frecuencia de 60 Hz, evitando el trabajo computacional de una simulación transitoria completa.

III. RESULTADOS DEL MODELO ELECTROMAGNÉTICO DEL REACTOR

El modelo integrado en COMSOL® utiliza dos métodos para calcular la curva B-H ajustada del material: el método de la Energía Simple y el método de la Energía Promedio. En este caso se utilizó la curva ajustada con el método de energía simple y se calculó la inductancia en función de la tensión aplicada al reactor. La tensión se cambió desde de 0.2 p.u. a 2 p.u. del valor nominal, tal como se observa en la tabla III.

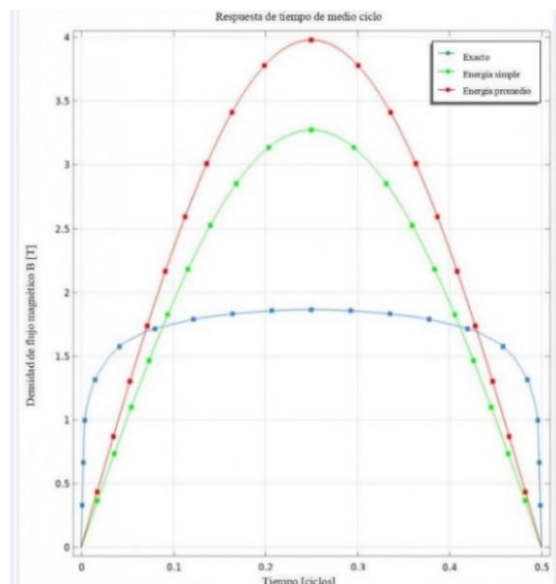


Figura 7. Deformación de la onda debido a la no-linealidad

El ajuste de la curva B-H se observa en la Figura 8 [5].

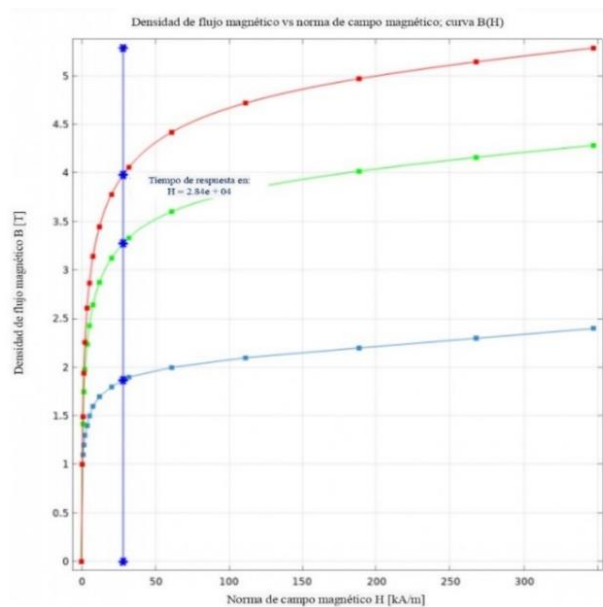


Figura 8. Curva B-H ajustada [5]

Tabla III. Resultados de COMSOL®

Tensión [p.u.]	Inductancia[H]
0.2	5.5
0.4	5.5
0.6	5.5
0.8	5.5
1	5.5
1.2	5.5
1.4	5.5
1.6	4
1.8	3.3
2	2.89

La Figura 9, muestra el valor de la inductancia respecto al cambio a la tensión. En esta figura se puede observar que el valor de la inductancia permanece constante hasta un determinado nivel de tensión aplicada al reactor. Entre 0.2 y 1.4 p.u. del valor de la tensión nominal, la inductancia no cambia y es de 5.5 H.

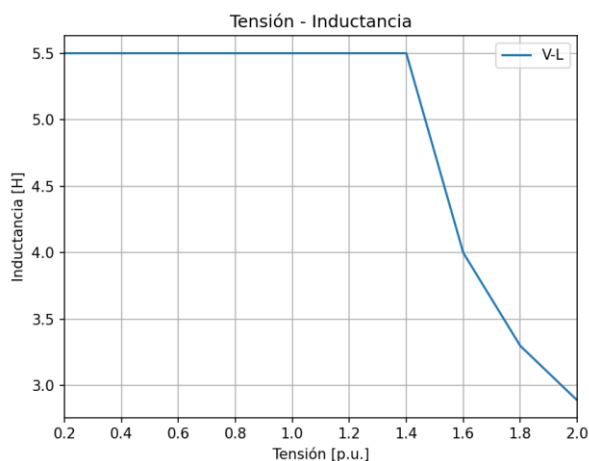


Figura 9. Curva calculada de Tensión vs Inductancia

Superando 1.4 p.u. del valor de la tensión nominal, la inductancia comienza a dejar el comportamiento lineal, para comportarse de manera no lineal o saturado. A este par ordenado, se le conoce como punto rodilla y es muy importante, ya que es determinante en el diseño de los reactores. A esta inductancia se le denomina inductancia no saturada y es el valor nominal y operacional de la reactancia. El valor de la inductancia en la zona saturada decrece en magnitud con el incremento en la tensión.

Estos resultados, Tabla IV, definen el comportamiento de la inductancia al cambio de tensión; con ello se procede al cálculo de la relación I-V o curva de magnetización del reactor (curva de linealidad).

Tabla IV. Relación I-V

Tensión [kV]	Tensión [p.u.]	Inductancia [H]	Reactancia inductiva [ohm]	Corriente [A]	Corriente [p.u.]
46.18	0.2	5.5	2073.45	22.27	0.2
92.37	0.4	5.5	2073.45	44.55	0.4
138.56	0.6	5.5	2073.45	66.82	0.6
184.75	0.8	5.5	2073.45	89.10	0.8
230.94	1	5.5	2073.45	111.37	1
277.12	1.2	5.5	2073.45	133.65	1.2
323.31	1.4	5.5	2073.45	155.93	1.4
369.50	1.6	4	1507.96	245.03	2.2
415.69	1.8	3.3	1244.07	334.13	3
461.88	2	2.89	1089.50	423.93	3.8

Con la información de la Tabla IV, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 10. Aquí se observa la prueba de linealidad elaborada en el software COMSOL Multiphysics®. Es importante mencionar que con COMSOL® se calculó la inductancia para cada nivel de tensión desde 0.2 hasta 2.0 en p.u. Lo anterior da como resultado que los valores de inductancia obtenidos en la región con saturación varíen con el nivel de tensión (ver Figura 9), a diferencia de la prueba experimental donde se obtiene un solo valor para la región con saturación.

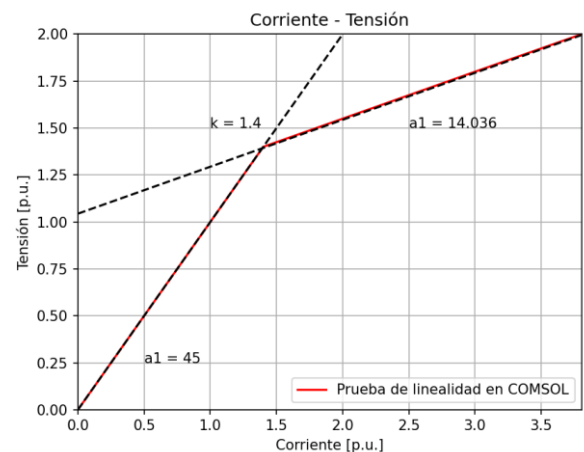


Figura 10. Curva de linealidad I-V calculada.

De acuerdo con la especificación de CFE Y-1000-03 [7] y la IEC-60076-6[3], los reactores con característica no lineal tienen su intervalo de operación nominal en la parte lineal de la característica magnética del reactor. k tiene un valor de entre 120% y 140%. Valores cercanos a 140% se requieren cuando las líneas de transmisión son muy largas.

El valor para la relación de pendientes a_2/a_1 está definido en un rango entre un 20% y un 40%. El valor de esta relación de pendientes es grande para los reactores de grandes capacidades y muy alta tensión. Sobre la curva de linealidad de la Figura 10 se trazan estas pendientes, donde:

- $a_1 =$ Ángulo de la característica en la zona lineal
- $a_2 =$ Ángulo de la característica en la zona no lineal
- $k =$ Rodilla del punto de saturación, intersección de las rectas de saturación y no saturación

Los resultados finales se muestran en la Tabla V

Tabla V. Resultados de la prueba

Factor k	Calculado	Valor requerido	Diferencia	Resultado
	1.4	1.375	0.025	Aprobado

En base a las pruebas de laboratorio del reactor (Figura 3) el valor real es $k = 1.392$. Ambos valores obtenidos se encuentran en el porcentaje aceptado según las especificaciones de CFE Y-1000-03 y la IEC-60076-6 las cuales rigen esta prueba; e indican un valor de k de 1.2 a 1.40, y con una diferencia no mayor a 0.025 con respecto al valor de garantía ofrecida por el fabricante.

En la Tabla VI se comparan los valores de inductancia obtenidos con la prueba experimental y con el software COMSOL®. Se observa que en la zona lineal la diferencia entre la inductancia calculada y medida es de un poco menos del uno por ciento (0.96%); mientras que, en la región saturada, para un valor de tensión de 2 p.u. la diferencia crece a 8.7 %. En la Figura 11 se observan ambas curvas: La obtenida con la prueba experimental y la calculada con COMSOL®.

Tabla VI. Comparación de inductancias medidas y calculadas

Tipo de inductancia	Simulación COMSOL	Prueba experimental	Diferencia entre COMSOL y Experimental	% error
Inductancia saturada [H]	2.89	2.65	0.23	8.77
Inductancia no saturada [H]	5.50	5.44	0.05	0.96
Relación de inductancia	0.52	0.48		

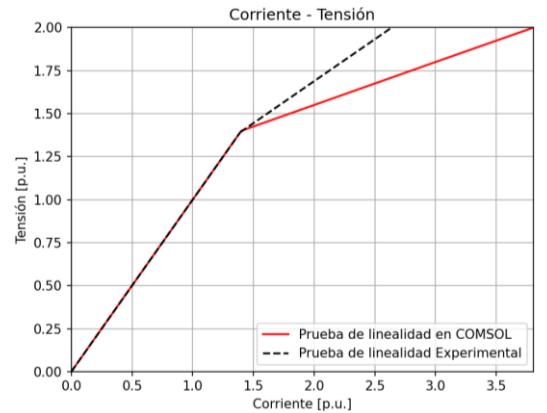


Figura 11. Comparación entre la curva obtenida con la prueba de linealidad y la curva obtenida con los resultados en COMSOL®

IV. CASOS DE APLICACIÓN: ESTUDIO DE SOBRETENSIONES EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON COMPENSACIÓN REACTIVA

En esta sección, utilizando el software comercial PSCAD®, se simuló una línea de transmisión de alta tensión de 400 kV compensada con el reactor en derivación analizado anteriormente. El modelado de la línea de transmisión es un ejemplo real tomado del Programa de Ampliación y Modernización 2022-2026, del Sistema Eléctrico Nacional [6]. La línea de transmisión es de 400 kV y va de la subestación BÁCUM (BAC) a la subestación Choacahui (CHO). Esta línea de transmisión pertenece a la región Noroeste del Sistema Eléctrico Nacional y se encuentra cerca del mar de Cortés. La línea de transmisión tiene una longitud de $141 + 70 + 30 = 241$ km y tiene dos conductores por fase de 1113 KCMIL como se observa en la Figura 12.

Inicialmente y para estudiar el comportamiento del reactor, se muestran los resultados de simulación de la línea de transmisión: Primero cuando el reactor de compensación no está conectado y posteriormente cuando el reactor en estudio se encuentra conectado. También se compara contra el caso de tener un reactor lineal (núcleo de aire) conectado al sistema.

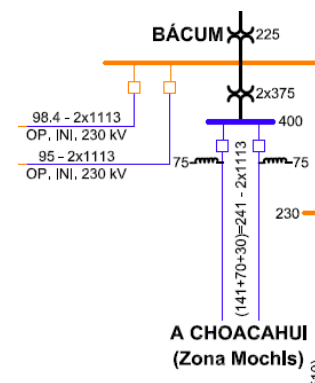


Figura 12. Diagrama unifilar de la línea de transmisión [6]

En estas simulaciones se registraron los valores de potencia reactiva y tensión en ambos extremos de la línea, con estos datos se puede observar el valor de la tensión desde una carga de 0 MW hasta el valor del SIL o potencia natural de la línea.

El valor de tensión en el nodo de recepción se le denominará sobretensión temporal por efecto Ferranti o sobretensión Ferranti. En la Figura 13 se observa el cambio de la tensión al variar la carga. Se observa como en vacío y sin reactor, la sobretensión Ferranti es significativamente grande, en cambio cuando la línea se encuentra compensada (con el reactor conectado), la tensión en el nodo de recepción se encuentra muy cercana a los 400 kV esperados. La intersección de la línea punteada y la curva de la línea de transmisión sin reactor muestra el valor del SIL del sistema (ver Figura 13).

Finalmente, la pérdida de carga se simuló desconectando la carga por medio de un interruptor de potencia. El tiempo en el que se abre el interruptor es de 0.196 segundos. En ese instante se crea una sobretensión en la línea (sobretensión por maniobra).

Se simularon tres casos:

- Línea de transmisión sin reactor.
- Línea de transmisión con un reactor saturable
- Línea de transmisión con un reactor no saturable (lineal)

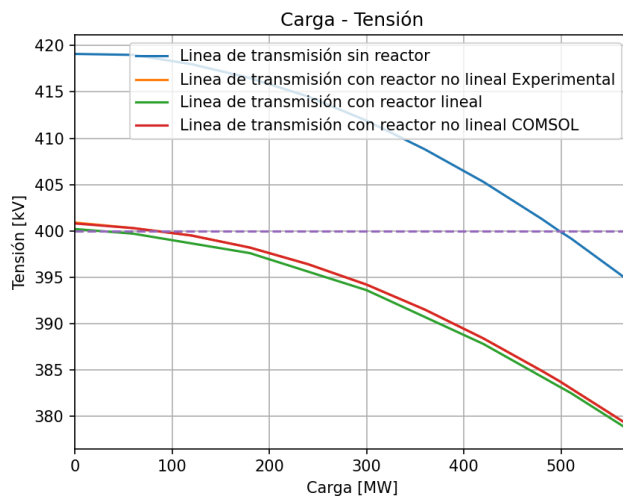


Figura 13. Resultados de la sobretensión Ferranti

En la Figura 14 se observa que, sin reactor, al aumentar la carga desconectada, la sobretensión que se produce es mayor; y además se observa cómo el reactor en derivación con núcleo magnético (reactor saturable) compensa la tensión en la línea de transmisión ante la pérdida de carga y limita las sobretensiones que se presentan al abrir el interruptor de mejor manera que el reactor no saturable (lineal) para cargas arriba de aproximadamente 70 MW, en este caso particular.

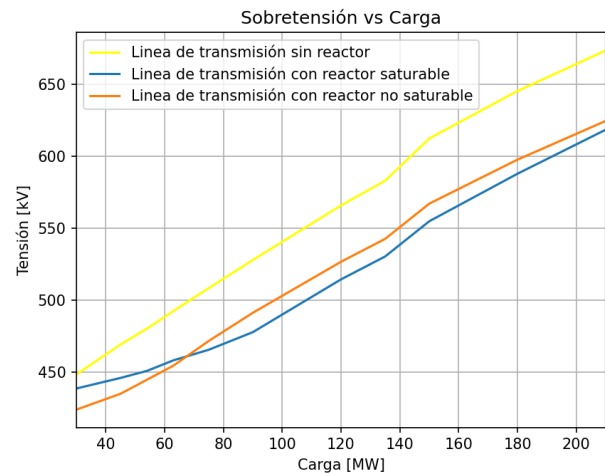


Figura 14. Comparación de las sobretensiones pico por pérdida de carga en una línea de transmisión con reactor saturable (no lineal), reactor lineal y sin reactor.

En general el reactor saturable tiene un buen comportamiento frente a las sobretensiones por pérdida de carga.

V. CONCLUSIONES

La linealidad de un reactor en derivación depende de sus parámetros de diseño y en gran parte de las propiedades magnéticas del núcleo. El cálculo de la inductancia no saturada utilizando el método de elemento finito resultó ser muy preciso al compararlo con los valores obtenidos durante las pruebas de laboratorio, mientras que la inductancia saturada presentó diferencias mayores respecto al valor reportado en las mediciones. El valor de la constante k fue muy cercano al valor determinado experimentalmente. Asumiendo que el ajuste de la curva B-H realizado en COMSOL® es adecuado para resolver el problema en el dominio de la frecuencia, las variaciones observadas en la inductancia saturada se atribuyen a tolerancias entre los valores medidos durante la prueba de linealidad y que, en el modelo electromagnético utilizado, no se consideró el efecto del tanque y de los componentes estructurales de sujeción del reactor. Aun así, la desviación del 8.77% se considera satisfactoria para este estudio.

Respecto al estudio de los transitorios por sobretensión en la línea de transmisión, se demuestra la importancia de contar con valores precisos de la curva de linealidad de los reactores de compensación. Al comparar el comportamiento en la línea, con el reactor saturable (núcleo magnético) y con el no saturable (núcleo de aire):

- El reactor saturable presenta mejor control de la sobretensión por maniobra para cargas mayores de 70 MW.
- En cargas menores, el reactor no saturable presenta mejor control de la sobretensión para este caso en particular.

REFERENCIAS

- [1] CIGRE 655 (WG A2.48) “Technology and utilization of oil-immersed shunt reactors”, 2016
- [2] Instituto de Investigaciones Eléctricas, Manual de transformadores y reactores de potencia tomo 1, 2da edición, instituto de investigaciones eléctricas, 2007
- [3] Power Transformers – Part: 6 Reactor IEC 6076-6-2007
- [4] IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Shunt Reactors Rated Over 500 kVA, IEEE C57.21-2021.
- [5] COMSOL Multiphysics Application Library /applications.effective_nonlinear_magnetic_curves%20(3).pdf
- [6] CENACE. “Modelo general de planeación de 2022-2027 de diagramas unifilares de la RNT y RGD”. [https://www.cenace.gob.mx/Docs/10_PLANEACION/Diagramas Unifilares/Mod%20Gral%20Planeaci%C3%B3n%202022-2027%20Diagramas%20Unifilares%20RNT%20y%20RGD%20de l%20MEM%20actualizaci%C3%B3n.pdf](https://www.cenace.gob.mx/Docs/10_PLANEACION/Diagramas%20Unifilares/Mod%20Gral%20Planeaci%C3%B3n%202022-2027%20Diagramas%20Unifilares%20RNT%20y%20RGD%20de%20MEM%20actualizaci%C3%B3n.pdf)
- [7] Y1000-03 CFE, “Reactores en derivación y reactores de neutro”, Julio 2010.