

Vida de Transformadores de Potencia

Sumergidos en Aceite correlación entre la vida y la temperatura

Un enfoque para suscripción y atención del reclamo

VALUATIVE

LÍDERES EN INVESTIGACIÓN Y PROTECCIÓN PATRIMONIAL

Cra. 7 No. 156 – 10 Of. 1607 / Edificio Torre Krystal
Bogotá D.C., Colombia
Pbx: +57 (1) 3902846
info@valuative.co

RISK AND CLAIM ADVISOR
06
EN ESTE NÚMERO:
VIDA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA SUMERGIDOS EN ACEITE
CORRELACIÓN ENTRE LA VIDA Y LA TEMPERATURA
UN ENFOQUE PARA SUSCRIPCIÓN Y ATENCIÓN DEL RECLAMO

FUENTE: IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 5, NO. 1, MARCH 2007
W. Flores, E. Mombello, Senior Member, IEEE,
G. Rattá, Senior Member, IEEE,
José Antonio Jardini, Fellow IEEE

Resumen - El presente documento es una revisión del estado del arte del problema de la vida del transformador de potencia sumergido en aceite. Se revisa el problema de la diferencia entre la vida del aislamiento y la vida del transformador de potencia, se analizan las guías de carga de IEEE e IEC y se muestra gráficamente la diferencia que existe entre ambas guías de carga a distintos valores de temperatura.

I. INTRODUCCIÓN

En vista del gran número de transformadores envejecidos muchas compañías están interesadas en conocer el tiempo de vida y el estado del aislamiento sólido de su equipo, para tratar así de extender su tiempo de vida útil.

La vida de los transformadores de potencia es un asunto de interés para las compañías que brindan el servicio de la electricidad, fabricantes de transformadores y compañías de seguros.

El conocimiento de la vida remanente de los transformadores de potencia es un factor decisivo para gestionar el riesgo asociado con la confiabilidad de la red de transmisión y, por supuesto, para brindar un servicio eléctrico de calidad.

La evaluación de la vida de cualquier equipo tiene relación con su proceso de envejecimiento. Las máquinas eléctricas se deterioran de distintas maneras, de acuerdo con su diseño y propósito. Cualquier máquina está expuesta (en distinto grado), a solicitaciones térmicas, mecánicas, eléctricas y provocadas por el medioambiente. Por ello, la evaluación de la condición del transformador, mediante métodos de supervisión en y fuera de línea, se ha vuelto una estrategia clave para conocer el estado del equipo.

Un transformador llega al final de su vida cuando es incapaz de llevar a cabo su función, la cual es el ser un enlace confiable entre las distintas partes de un sistema de potencia que están a diferentes niveles de tensión.

Por lo general, un transformador de potencia es un dispositivo muy confiable que está diseñado para lograr una vida útil de 20-35 años y una vida mínima de 25 años a temperaturas de funcionamiento comprendidas entre 65 °C y 95 °C. Aunque en la práctica la vida de un transformador de potencia podría llegar a 60 años con un mantenimiento adecuado y en función de la fecha de fabricación, ya que se ha observado en transformadores producidos recientemente una edad promedio al fallo de 14,9 años en idénticas condiciones de trabajo.

El papel impregnado con aceite se utiliza con gran profusión como aislamiento de los devanados del transformador, razón por la que en la industria rige la premisa que: *la vida del transformador es la vida del papel*. Sin embargo, este tipo de aislamiento está considerado como el eslabón más débil en la cadena de cualquier sistema de transmisión.

El aislamiento papel-aceite se degrada con el tiempo y el proceso depende de las condiciones térmicas y eléctricas, de la cantidad de agua y oxígeno, y de otras condiciones presentes en el interior del transformador. Otros aspectos como fallos externos y sobretensiones, tienen un efecto negativo en la condición del material aislante y cuando el aislamiento ha envejecido mucho, supervisar estos otros aspectos es muy importante. Aunque los transformadores no tienen partes móviles a excepción del flujo de aceite, sus sollicitaciones mecánicas son importantes, especialmente durante cortocircuitos.

La expectativa de vida técnica de un transformador de potencia está determinada por varios factores: diseño del equipo, historia y futuros eventos, condiciones presentes y futuras de trabajo y el estado actual del aislamiento.

El objetivo de este trabajo es describir el problema de la vida del transformador de potencia, así como mostrar el uso de las guías de carga y las posibles diferencias que se pueden encontrar al usar una u otra guía de carga.

II. VIDA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y VIDA DE SU AISLAMIENTO

En principio, el envejecimiento de los transformadores se recoge en las guías de carga del IEEE e IEC. La idea básica de estas guías data de hace más de 50 años. De acuerdo a ellas, el envejecimiento y la duración de vida del aislamiento del transformador podrían describirse, casi exclusivamente, por la degradación térmica de las propiedades del papel aislante ubicado entre el devanado del transformador.

Un comentario en la guía de carga del IEEE señala que debido a los muchos factores que causan deterioro del aislamiento del transformador y que influyen en el efecto acumulativo de la temperatura en un determinado tiempo, se imposibilita predecir con precisión la vida útil del aislamiento en condiciones controladas y mucho menos ante situaciones de servicio sujetas a cambio.

En dicha guía, siempre que se utiliza el término “vida” se hace referencia a la vida calculada del aislamiento y no a la vida real del transformador. La relación entre la vida del aislamiento y la del transformador es una incógnita todavía sin resolver, debido al hecho conocido, que bajo ciertas condiciones, la vida del transformador puede superar la vida del aislamiento.

El estimar de forma absoluta en años la vida remanente del equipo, es difícil debido a que implica muchas suposiciones p.e. una clara definición de “final de vida” y certeza acerca de fatigas futuras. El punto de final de vida del aislamiento es una variable desconocida todavía, máxime teniendo en cuenta el gran debate originado en la comunidad profesional acerca de los valores esperados de “vida normal” y el criterio de “final de vida”

A. Punto de final de vida del transformador de potencia

El punto de final de vida del transformador de potencia se puede clasificar de la siguiente manera:

- 1) Final de vida técnico: ocurre cuando el transformador podría o debería ser puesto fuera de servicio debido a razones técnicas, físicas o a un cierto debilitamiento de la integridad técnica del transformador.
- 2) Final de vida estratégico: originado por cambios en la red p.e. cambios en la cargabilidad y tensión de servicio, variación de la capacidad de cortocircuito de transformadores viejos.
- 3) Final de vida económico: ocurre debido a condiciones económicas de la empresa a cargo del equipo p.e. gestión de las pérdidas y costes de mantenimiento.

B. Punto de final de vida del aislamiento

En la Tabla I se muestran ejemplos de opciones absolutas en la selección de la vida del aislamiento. Los valores de vida mostrados ilustran el efecto de las variables significativas, aunque los valores finales usados para calcular la vida del aislamiento se deben basar en el consenso de los datos del envejecimiento disponibles en la industria.

TABLA I
DEFINICION DE VIDA DE AISLAMIENTO

Bases	Humedad Aislamiento %	Nivel Oxígeno	Vida (horas)
50% Rigidez Mecánica	0,5	Bajo **	65.020
	1,0	Bajo	32.510
	2,0	Bajo	16.255
	0,5	Alto ***	26.000
	1,0	Alto	13.000
	2,0	Alto	6.500
20% Rigidez Mecánica (Ver Nota)	0,5	Bajo	152.000
	1,0	Bajo	76.000
	2,0	Bajo	38.000
	0,5	Alto	60.800
	1,0	Alto	30.400
	2,0	Alto	15.200
200 DP	0,5	Bajo	158.000
	1,0	Bajo	79.000
	2,0	Bajo	39.500
	0,5	Alto	63.200
	1,0	Alto	31.600
	2,0	Alto	15.800

** Cuba sellada *** Acceso a la atmósfera

Nota: Un punto final levemente más conservador sería 25% de rigidez mecánica residual a una vida de 135.000 h (para un aislamiento seco).

En dicha tabla se observa que el valor de la rigidez dieléctrica no es utilizado (entre otras variables), debido a que el daño evolutivo observado en esta variable es más lento que otros criterios. Por lo tanto, las características mecánicas del papel son los factores determinantes en el criterio del final de vida del papel aislante.

Por otro lado, al usar los valores de DP (grado de polimerización, por sus siglas en inglés) como criterio de final de vida, diferentes investigadores usan distintos valores p.e. Shroff 250, McNutt 200, aunque, en la literatura se observa una tendencia hacia un valor de DP = 200

El DP representa el número de monómeros de glucosa, $C_6H_{10}O_5$, presentes en la molécula de la celulosa del papel. El valor del DP está críticamente relacionado con la rigidez mecánica del papel. Durante la fabricación de un transformador, el DP del papel se encuentra entre 1000 y 1300, el secado del transformador lo reduce a 950 y el envejecimiento en servicio lo reduce mucho más. A un DP entre 950 y 500, la rigidez mecánica es constante, pero en el margen de 500-200 la rigidez mecánica decrece en proporción directa al DP. A un DP de 150 la rigidez mecánica se reduce a 20% de su valor inicial y debajo de este valor el papel no tiene rigidez mecánica alguna, por lo que en la industria se considera que debajo de un DP =200, el papel pierde todas sus propiedades mecánicas y el equipo es susceptible a daños.

En la Tabla I se observa que un pequeño aumento en el porcentaje de humedad reduce en gran medida la expectativa de vida del aislamiento, por lo que el contenido de humedad es considerado en extremo dañino para el papel aislante. La presencia de humedad en el sistema de aislamiento juega un rol crítico en la vida del equipo, ya que la humedad deteriora la rigidez dieléctrica y mecánica, y bajo condiciones de sobrecarga promueve la evolución de burbujas en el aceite, con la consiguiente inestabilidad térmica del sistema de aislamiento. En términos generales, la vida mecánica del aislamiento se reduce a la mitad cuando se dobla el contenido de humedad y la tasa de deterioro del papel es proporcional al contenido de agua.

En lo que respecta al contenido de oxígeno, su reacción con el aceite aislante crea productos químicos derivados de la oxidación p.e. ácidos, aldehídos, epóxidos, etc. que son agresivos con el papel y lo desgarran molécula a molécula, por lo que afectan de manera negativa la vida del papel aislante, tal como se muestra en la Tabla I. Asimismo, la degradación del papel por oxígeno produce humedad, lo cual debilita las uniones de

las moléculas de la glucosa del papel, por lo que reacciones secundarias provocarían rupturas en la cadena del polímero lineal (celulosa) que confiere la rigidez mecánica al papel, degradándolo y disminuyendo así su grado de polimerización y su rigidez mecánica.

III. **CORRELACION ENTRE LA VIDA Y LA TEMPERATURA**

En la búsqueda por obtener un valor numérico aproximado de la vida del transformador de potencia, la industria ha desarrollado dos métodos:

- Las guías de carga, basadas en el modelo de Arrhenius-Dakin.
- La obtención del DP de manera directa o mediante el contenido de furanos en el aceite.

El segundo método se analiza en la parte II del presente trabajo.

Otros métodos de detección de fallos como las descargas parciales, en y fuera de línea, son muy efectivos en el seguimiento y detección de fallos tempranos en el aislamiento de los transformadores de potencia, pero no serán tratados en este artículo, habida cuenta que no se consideran métodos que especifiquen de manera concreta el tiempo de vida utilizado y final de vida del aislamiento, como sí lo especifican los dos métodos antes mencionados.

A. *El Modelo de Arrhenius-Dakin*

El modelo clásico para el cálculo de la vida remanente de un transformador de potencia ha sido el modelo de Arrhenius – Dakin mostrado a continuación:

$$\text{Vida Remanente} = L = Ae^{B/T}$$

donde A: Vida inicial y B: constante, son evaluados por la energía y la tasa de activación de una reacción química específica y T es la temperatura en K (Kelvin). La ecuación puede representarse por:

$$\ln(L) = \ln(A) + B/T$$

Este modelo se basa en la tasa de reacción química de Arrhenius y asume que el envejecimiento debido a las fatigas eléctrica, mecánica y del medioambiente no tiene un impacto notable en la vida del aislamiento durante operación normal. El modelo A-D es considerado de fatiga simple (temperatura) y es el que más se utiliza en el análisis de fatiga por temperatura en aislamiento eléctrico. Este modelo es la base de varios estándares que relacionan la vida del aislamiento con la temperatura.

Sin embargo, basar la esperanza de vida de un transformador solamente en el debilitamiento de las características mecánicas del aislamiento y considerando solamente la influencia de la temperatura, se ha sobre enfatizado demasiado en la tecnología del transformador.

Comparativamente, es escasa la información sobre fallos de transformadores que sea atribuible a fallos primarios como consecuencia del envejecimiento térmico del material aislante.

En su lugar, hay consenso que eventos anormales tales como sobretensiones y fallos en el sistema son mucho más perjudiciales que el envejecimiento a largo plazo. Sin embargo, el envejecimiento de largo plazo puede hacer al transformador propenso al fallo ante tales eventos.

El modelo A-D permite obtener una medida de la vida esperada de un material aislante a temperatura de operación normal, extrapolando tres o cuatro puntos de la curva de envejecimiento; pero, desde el punto de vista estadístico no es del todo aceptado, debido a que la confiabilidad de los datos extrapolados es más baja conforme estos se alejan de la curva

de datos obtenidos en ensayos a pie de obra. Otra desventaja en usar el modelo A-D es, como ha sido mencionado antes, que este modelo está basado en la tasa de una reacción química, denominada “reacción química principal”, cuando es de esperarse que en el interior del transformador surjan otras reacciones químicas a diferentes temperaturas o se produzcan distintas reacciones simultáneamente.

De lo anterior se desprende que, debido a que B en (2) es proporcional a la energía de activación; entonces, si la reacción química cambia debido a la variación de temperatura, B también sufrirá cambio, causando variaciones en la pendiente de la curva e incurriendo en errores en los resultados. Esta es una de las posibilidades de cometer errores al extrapolar de condiciones de ensayo a condiciones de baja temperatura. Aunque un posible valor de consenso para B puede ser 15.000, tal como lo propone McNutt en *W.J. McNutt, “Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992*

Guías de Carga

Se han utilizado las guías de carga como una referencia obligatoria para el cálculo de la vida del aislamiento del transformador de potencia. En ambas el cálculo está basado en la temperatura del punto más caliente del devanado del transformador (θ_H) tomando en consideración el modelo A-D.

Ambas guías coinciden en que el valor θ_H está compuesto según:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H$$

Donde θ_A : temperatura ambiente, $\Delta\theta_{TO}$: diferencia de temperatura entre la temperatura del aceite en la parte superior de la cuba y la temperatura ambiente y, $\Delta\theta_H$: diferencia de temperatura entre el punto más caliente del devanado y la temperatura del aceite en la parte superior de la cuba.

A su vez, $\Delta\theta_{TO}$ y $\Delta\theta_H$ se definen en estado transitorio (variación de carga) de acuerdo con (1) y (2), respectivamente.

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,U} - \Delta\theta_{TO,i}) [1 - e^{-t/\tau_{TO}}] + \Delta\theta_{TO,i} \quad [1]$$

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,U} - \Delta\theta_{H,i}) [1 - e^{-t/\tau_W}] + \Delta\theta_{H,i} \quad [2]$$

Donde, los subíndices **i** y **u** indican los valores iniciales y finales, respectivamente; τ_{TO} y τ_W son las constantes de tiempo del aceite y del devanado, respectivamente. Los valores iniciales y finales de $\Delta\theta_{TO}$ y $\Delta\theta_H$ son definidos en la guía de carga IEEE, de acuerdo con (3) y (4), sustituyendo el subíndice x por el subíndice i o u, según sea el caso.

$$\Delta\theta_{TO,x} = \Delta\theta_{TO,r} \left[\frac{(K_X^2 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \quad [3]$$

$$\Delta\theta_{H,x} = \Delta\theta_{H,r} K_X^{2m} \quad [4]$$

donde, el subíndice r indica valores a carga nominal, K es la relación de la potencia del equipo con respecto a la potencia nominal, R es la relación de las pérdidas a carga nominal con respecto a las pérdidas en vacío, n y m son constantes que dependen del sistema de enfriamiento utilizado en el equipo.

Aunque es bien sabido que no es correcto considerar a n y m constantes, ya que varían con las variaciones de carga. La guía IEEE propone algunos valores para estos exponentes.

En la guía IEC las ecuaciones en estado estable son algo distintas, dependiendo del sistema de enfriamiento utilizado en el equipo.

La guía IEC es principalmente aplicable al aislamiento con papel no enriquecido térmicamente y la temperatura de punto caliente está limitada en la guía a 98 °C, a una temperatura ambiente de 20 °C. Por otro lado, la guía del IEEE usa los valores de 110 °C a 30 °C, para las mismas temperaturas, respectivamente. En la guía de IEC no hay caso en el cual θ_H sea mayor a 140 °C, debido a que se considera que a valores superiores el modelo A-D no es completamente aplicable, debido a la posible presencia de gases libres procedentes del aislamiento. La guía IEEE permite valores de hasta 180 °C.

No existe un valor de "vida absoluta"; en su lugar, en la guía IEEE se define "la vida por unidad" (5) y el "factor de aceleración de envejecimiento" (FAA) (6). La guía IEC propone "la tasa de envejecimiento relativo" (7), la cual es doblada por cada 6 °C de incremento (fijo) en θ_H (sobre una base continua).

$$\text{Vida (p.u.)} = 9.80 \cdot 10^{-18} e^{\left[\frac{15000}{\theta_H + 273} \right]} \quad [5]$$

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right]} \quad [6]$$

$$\text{Tasa de Envejecimiento Relativo} = V = 2^{(\theta_H - 98)/6} \quad [7]$$

El F_{AA} es más grande que 1 cuando θ_H es más elevada que 110 °C, lo que sugiere pérdida de vida (para envejecimiento normal) y es menor que 1 cuando θ_H es inferior a 110 °C, y por tanto es indicador de la extensión de vida. Sin embargo, el equivalente ganado en vida por operar a bajas temperaturas es menor que la correspondiente pérdida por trabajar a altas temperaturas.

El uso de la expresión (7) puede ser considerado despreciable a un θ_H por debajo de 80 °C

En la guía del IEEE la ecuación (6) se usa para calcular el envejecimiento equivalente del transformador. La vida equivalente (F_{EQA}) (en horas o días), a la temperatura de referencia, que será consumida en un período de tiempo dado t para el ciclo de temperatura dada, se calcula por (8).

$$F_{EQA} = (t)^{-1} \int_0^t F_{AA} dt = \left(\sum_{n=1}^N \Delta t_n \right)^{-1} \sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n \quad [8]$$

Con este valor el porcentaje de pérdida de vida, si la vida normal (NIL) es conocida, está definido por la expresión [9].

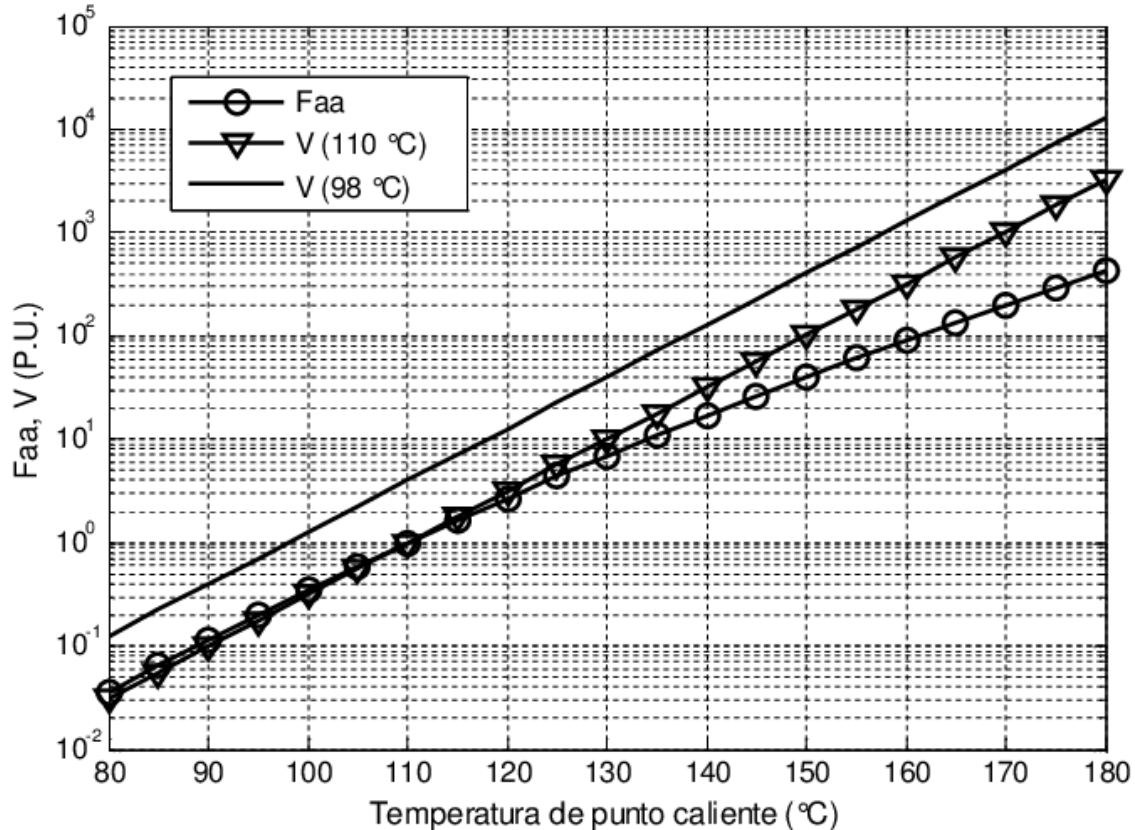
$$\% \text{ Pérdida de vida} = (F_{EQA} t \ 100) / \text{NIL} \quad [9]$$

La NIL no se define de manera única, por lo que se deja al usuario la libertad de seleccionar un valor adecuado. La guía de IEEE propone algunos valores de referencia para un sistema de aislamiento bien seco.

Un procedimiento similar se observa en la guía de IEC, en donde la pérdida relativa de vida sobre un cierto intervalo de tiempo se calcula mediante (10).

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \quad [10]$$

En la búsqueda de una posible comparación entre ambas guías de carga, en la fig. 1 se ha cambiado la referencia de V a 110 °C y como se puede apreciar, a temperaturas superiores a 115 °C, aproximadamente, ambos modelos arrojarán resultados distintos. Esto se debe a que cada guía de carga está elaborada tomando en consideración distintos tipos de papel aislante y por lo tanto distintos modelos. En la versión más reciente de la guía de carga IEC [23] se especifica que los modelos son idénticos en el caso que el papel sea térmicamente mejorado, como es el caso de la guía de carga del IEEE [6]. En ambas guías se muestran ejemplos de cálculo de envejecimiento relativo y de θ_H



Faa (IEEE) y V (IEC) en función de la temperatura de punto caliente

El procedimiento para calcular la vida de un transformador, basado en las guías de carga, se considera de fácil aplicabilidad pero impreciso debido a que solamente se tiene en cuenta la temperatura como el único agente de degradación, ignorando los efectos de otros tipos de degradación presentes en condiciones de servicio. Además, si se desconocen los factores ambientales que influyen en la degradación del papel p.e. oxígeno y humedad, las tasas de reacción son impredecibles con un factor de 3-4. Por otro lado, si la temperatura no es medida, sino estimada por métodos imprecisos sugeridos por estándares o por mediciones del punto caliente realizadas por imagen térmica, esto añade un error de alrededor de 2 en la tasa de reacción.

CONCLUSIONES

Las guías de carga siguen siendo la referencia, aunque hasta cierto punto conservadora, en la obtención de un valor con mayor consenso de la vida del aislamiento del transformador de potencia.

Por otro lado, es recomendable realizar pruebas a diferentes condiciones de carga, distintas de la nominal, con la finalidad de obtener el perfil de variación de los valores n y m, para así reducir posibles errores en la obtención del valor de la temperatura de punto caliente, y por consiguiente, en la obtención de la vida del aislamiento.

Nos gustaría conocer su opinión sobre ésta Edición y su contenido, no sin antes aclarar que en próxima edición presentaremos un tema vinculado con el tratado aquí, complementándolo con sus importantes sugerencias sobre éste u otros aspectos que considere de interés

