

capítulo 8 — Verificação do isolamento: resistência de isolamento, tensão aplicada e tensão induzida

1. OBJETIVO

Até o presente ponto, analisaram-se os ensaios dos transformadores, determinando parâmetros e características, sob condições normais de operação. Ocorre, entretanto, que qualquer componente ao ser ligado a um sistema elétrico poderá sob certas circunstâncias ficar sujeito a sobretensões de diversas origens, tornando-se, pois, necessário conhecer ou prever seu desempenho quando sujeito a estas solicitações.

Torna-se, portanto, necessário estabelecer maneiras para a análise do isolamento do transformador. Neste capítulo, analisar-se-ão os métodos da tensão aplicada e tensão induzida. Além desses, será também estudado o processo mais simples para a determinação do estado do material isolante, que consiste na medida da resistência de isolamento.

2. SOLICITAÇÕES DO ISOLAMENTO

Como todas as máquinas elétricas, os transformadores trabalham segundo uma série de recomendações, observadas por motivo de segurança, melhor funcionamento etc. Entre essas especificações, cita-se o aterramento do tanque, do núcleo e de todas as partes metálicas inativas.

Assim, em funcionamento, além da diferença de potencial entre as bobinas de alta e baixa tensão, têm-se também tensões desses enrolamentos para as partes metálicas, que estariam aterradas. Se o isolamento não for adequado para essas tensões, poderão surgir as denominadas *correntes de fuga*, que se estabelecem pelo isolante, que por sua vez ocasionariam perda de potência, estabelecimento de arcos voltaicos e progressiva deteriorização do isolante.

Além disso, nota-se que, no enrolamento de alta tensão, por exemplo, a diferença de potencial entre uma espira e a seguinte é considerável, exigindo também um bom isolamento, pois, caso contrário, poderá surgir o já citado arco entre espiras, danificando o enrolamento. As Figs. 8.1 e 8.2 ilustram os pontos referidos acima, onde ocorrem diversos gradientes de potencial. Na Fig. 8.1 tem-se a constituição física do interior do transformador enquanto a Fig. 8.2 corresponde a uma representação mais esquemática. Na Fig. 8.2 tem-se uma indicação mais clara a respeito dos diversos gradientes de potencial que solicitam o isolamento.

Resumindo, pode-se dizer que no interior do transformador existem partes, a potenciais diferentes, que ocasionarão o aparecimento de diversos gradientes de potenciais e necessitam de isolamento adequado, para que sejam evitadas as correntes de fuga ou mesmo a abertura de arcos voltaicos.

No próprio projeto de transformador, tais gradientes são levados em consideração e, evidentemente, o isolamento elétrico já é dimensionado de modo a suportá-los. Contudo, poderá ocorrer que os isolantes usados não apresentem as características desejadas ou mesmo que com o decorrer do tempo, ou devi-

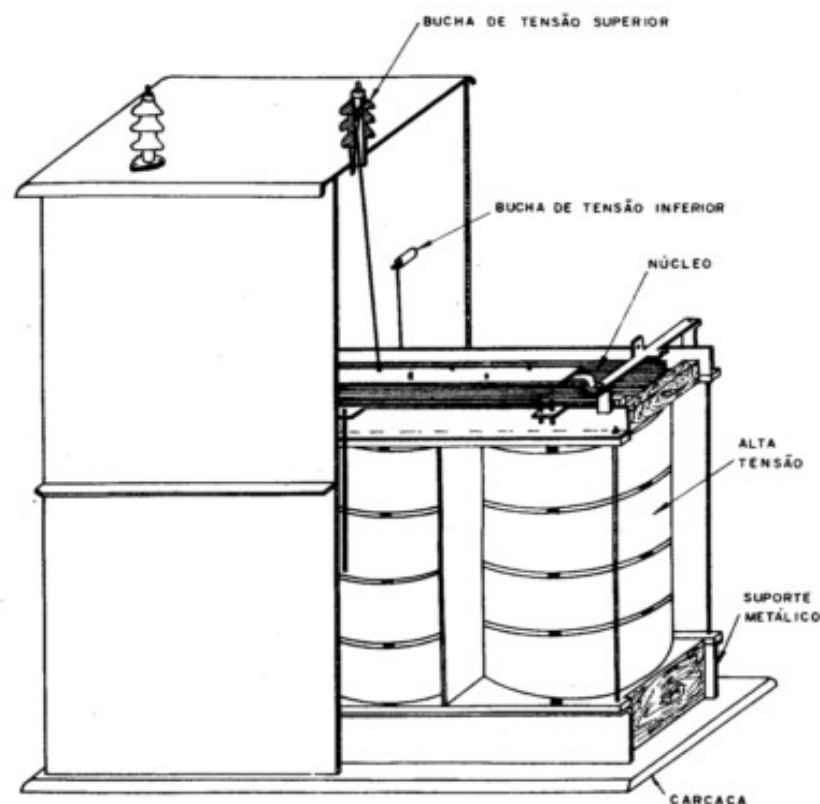


Figura 8.1 — O transformador e seus componentes

do a um distúrbio qualquer, o isolamento possa enfraquecer em um ponto qualquer. Se o transformador for colocado em funcionamento nessas condições, além da perda de potência haverá o sério risco de um curto-circuito interno. Esses fatos levam a concluir a necessidade de ensaios que venham a comprovar o estado do isolamento do transformador.

Os métodos usados para tal fim são: medição na resistência de isolamento, tensão aplicada e tensão induzida.

3. RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

O instrumento utilizado na verificação do isolamento entre enrolamentos e entre enrolamentos e massa (núcleo, carcaça etc.) é o megôhmetro. A resistência determinada, embora sujeita a grandes variações devido à temperatura, à umidade e à qualidade do óleo empregado, é um valor que dá idéia do estado

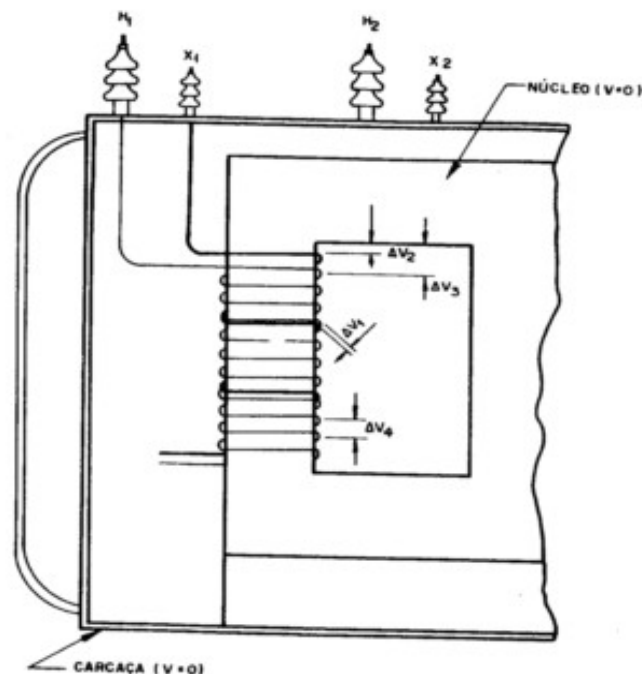


Figura 8.2 — O transformador em forma esquemática, de modo a visualizar os gradientes de potencial: V_1 , o gradiente de potencial entre bobinas de alta tensão e a baixa tensão; V_2 , o gradiente de potencial entre bobinas de baixa tensão e a massa; V_3 , o gradiente de potencial entre bobinas de alta tensão e a massa; e V_4 , o gradiente de potencial entre espiras do enrolamento de alta tensão

de isolamento antes de se submeter o transformador aos ensaios dielétricos (tensão aplicada, tensão induzida e impulso). Além disso, as medições permitem um acompanhamento do processo de secagem do transformador. Para a medida da resistência do isolamento, usa-se um instrumento que nada mais é que uma fonte de tensão ligada em série com um amperímetro. Como a corrente registrada é proporcional à resistência a ser medida, a graduação do amperímetro é feita diretamente em ohm ou, no caso, em megohm. Como o objetivo é a determinação do isolamento entre os enrolamentos e entre os mesmos e a massa, é conveniente uniformizar o potencial em toda a bobina. Para tanto conectam-se os terminais de um mesmo enrolamento, como mostra a Fig. 8.3. A medição deve ser feita entre os pontos 1 e 2, entre 1 e 3, e entre 2 e 3.

Existem hoje em dia diversos tipos de megôhmetros: manual, motorizado e eletrônico. O último é um dos mais difundidos atualmente.

Para medir corretamente o isolamento, a fonte deveria ter uma tensão que não poderia ser inferior a normal de serviço do equipamento a ser testado, pois o defeito que apareceria com esta tensão poderia não se manifestar com valo-

res mais baixos. Existem normas especificando quais as tensões para este teste, que, resumindo, são expressas em função da tensão nominal do transformador. Assim, chamando V_N a tensão nominal em volt, para transformadores até 10 kV o megômetro deverá ter uma fonte com tensão, em volt, dada por:

$$3,25 V_N \quad (8.1)$$

E, para transformadores acima de 10 kV:

$$15\,000 + 1,75 V_N \quad (8.2)$$

As mesmas normas especificam que a prova deverá ser realizada com tensões alternadas para que as condições de operação do enrolamento, no que se refere ao isolamento, sejam as mesmas que em funcionamento normal.

Acontece que, para se obter um megômetro com as características especificadas, facilmente se conclui das dificuldades de construção (ver valores de tensão). Devido a esse inconveniente e ao alto custo, a substituição é feita por

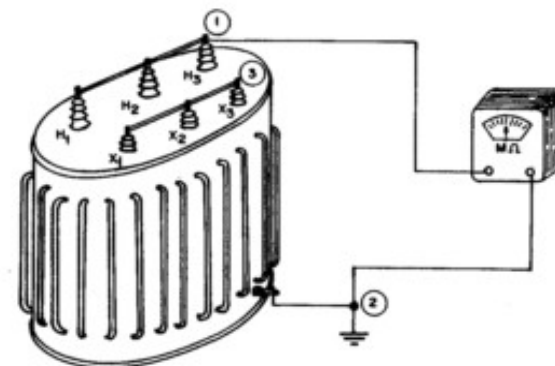


Figura 8.3 — Uso do megômetro para verificação do isolamento

fontes de corrente contínua que fornecem tensões de 500 a 5 000 V, dependendo do tipo. Nota-se, deste modo, que em muitos casos o uso dos megômetros é falho pelo fato de se usarem as tensões citadas, que poderão ser bastante inferiores à tensão nominal de um determinado transformador a ser ensaiado. A ABNT fixa que a tensão aplicada deverá ser de no mínimo 1 000 V para um transformador de até 69 kV, inclusive; e de 2 000 V, no mínimo, para os transformadores de classe superior aos 69 kV.

Os valores observados para as resistências medidas deverão ser iguais ou maiores aos dados pelas expressões a seguir, para que os transformadores possam ser empregados.

a) Transformadores secos

$$R_{i75^{\circ}\text{C}} = \frac{V_i}{\frac{S_n}{100} + 100} \quad (8.3)$$

b) Transformadores imersos em óleo

$$R_{i75^{\circ}\text{C}} = \frac{2,65}{\sqrt{S_n/f}} \cdot V_i \quad (8.4)$$

c) Transformadores imersos em Ascarel

$$R_{i75^{\circ}\text{C}} = \frac{0,265}{\sqrt{S_n/f}} \cdot V_i \quad (8.5)$$

em que: $R_{i75^{\circ}\text{C}}$ é a resistência mínima do isolamento a 75 °C, para cada fase; V_i , a classe de tensão de isolamento nominal do enrolamento considerado (em kV); S_n , a potência nominal do enrolamento considerado em kVA. Se o transformador for trifásico, a potência de cada enrolamento será 1/3 daquela dada na placa; e f , a frequência nominal em Hz.

Nota-se que os valores mínimos recomendados se referem a uma temperatura de 75 °C, que pode não corresponder àquela para a qual se está medindo R_i com o megôhmetro. Normalmente, o valor encontrado refere-se à temperatura ambiente.

Considerando que a resistência de isolamento é fortemente afetada pela temperatura, de modo a comparar o valor lido com o uso do megôhmetro com os mínimos recomendados, deve-se antes de mais nada colocá-los em uma mesma temperatura. Para tanto podem-se utilizar dois métodos:

a) Corrigindo a resistência mínima (R_i) de 75° para a temperatura ambiente

É o método recomendado pela ABNT. Para tanto, multiplica-se o valor encontrado para R_i por um fator de correção dado pela Tab. 8.1. O resultado corresponderá ao valor mínimo da resistência de isolamento permitido, para um determinado transformador à temperatura ambiente.

Exemplo: Qual a menor resistência de isolamento admissível a 25 °C para um transformador monofásico da classe de 15 kV, com potência de 15 kVA e frequência de 60 Hz, imerso em óleo mineral?

Por aplicação da expressão correspondente:

$$R_{i25^{\circ}\text{C}} = \frac{2,65 \times 15}{\sqrt{15/60}} = 78 \text{ M}\Omega$$

Tabela 8.1 — Fatores de correção para a determinação da resistência de isolamento mínima em temperaturas diferentes de 75 °C.

Temperatura (°C)	Fator de correção	Temperatura (°C)	Fator de correção
0	181	41	10,6
1	169	42	9,9
2	158	43	9,2
3	147	44	8,6
4	137	45	8,0
5	128	46	7,5
6	119	47	7,0
7	111	48	6,5
8	104	49	6,1
9	97	50	5,7
10	91	51	5,3
11	84	52	4,92
12	79	53	4,59
13	74	54	4,29
14	69	55	4,00
15	64	56	3,73
16	60	57	3,48
17	56	58	3,25
18	52	59	3,03
19	48,5	60	2,83
20	45,3	61	2,64
21	42,2	62	2,46
22	36,4	63	2,30
23	36,8	64	2,14
24	34,3	65	2,00
25	32,0	66	1,87
26	29,9	67	1,74
27	27,9	68	1,62
28	26,0	69	1,52
29	24,3	70	1,41
30	22,6	71	1,32
31	21,1	72	1,23
32	19,7	73	1,15
33	18,4	74	1,07
34	17,2	75	1,00
35	16,0	76	0,93
36	14,9	77	0,87
37	13,9	78	0,81
38	13,0	79	0,76
39	12,1	80	0,71
40	11,3		

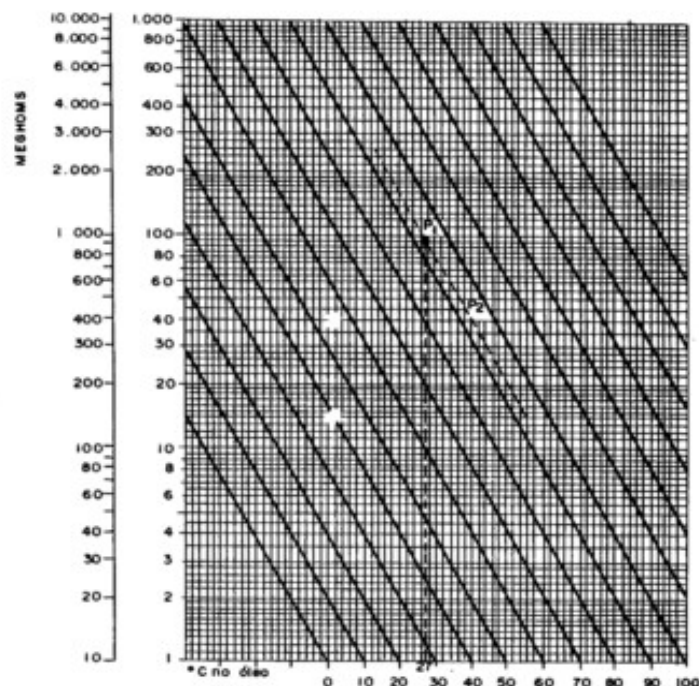
Pela Tab. 8.1 tem-se que o fator de correção será 32, portanto:

$$R_{125^{\circ}\text{C}} = 32 \times R_{75^{\circ}\text{C}} = 32 \times 78 = 2\,500\text{ M}\Omega$$

Portanto a menor resistência de isolamento admissível a 25°C será de 2 500 M Ω .

b) *Corrigindo a resistência medida com o megôhmetro da temperatura ambiente para 75°C*

Para tanto utiliza-se o ábaco abaixo, cujo manuseio pode ser compreendido pelo exemplo.



Exemplo: Um transformador tem sua resistência de isolamento determinada por um megôhmetro que indicou 1 000 M Ω , quando a temperatura ambiente era de 27°C . Qual será a correspondente resistência a 40°C ? Inicialmente, obtém-se um ponto dado pela intersecção da vertical tirada pelos 27°C com a horizontal a partir da resistência dada de 1 000 M Ω . Por este ponto (P_1), traça-se uma paralela às retas inclinadas. Levantando-se uma vertical a partir dos 40°C , tem-se pelo encontro desta com a reta inclina-

da um ponto P_2 , que indica no eixo da resistência um valor de 400 M Ω . Notar que o eixo usado foi o valor de máximo, 10 000 M Ω .

Com estes exemplos, tem-se uma idéia mais concreta a respeito da grande influência que a temperatura exerce sobre a resistência de isolamento.

Uma importante observação se faz necessária quando as medidas são realizadas com transformadores trifásicos. Ocorre que as fórmulas fornecedoras das resistências mínimas admissíveis correspondem aos menores valores das resistências de isolamento *por fase*. Por outro lado, quando é curto-circuito, por exemplo, as três buchas de TS, e determinando-se a resistência de isolamento em relação à massa, estar-se-ia lendo um valor correspondente à associação em paralelo de três resistências de isolamento (uma de cada fase), portanto:

$$R_{i(\text{lido})} = \frac{R_{i/\text{fase}}}{3} \quad (8.6)$$

em que: $R_{i(\text{lido})}$ é a resistência de isolamento lida com o megôhmetro e $R_{i/\text{fase}}$ a resistência de isolamento lida com o megôhmetro por fase.

De modo a comparar o valor lido com o mínimo normalizado, dever-se-ia tomar *uma* das providências a seguir:

- Multiplicar o valor lido por 3, comparando o resultado com o valor calculado; ou
- Dividir por 3 o valor de R_i calculado e compará-lo com $R_{i(\text{lido})}$.

Em relação à aplicação do ensaio sob consideração, pelas características do teste realizado, constata-se ser o mesmo bastante útil para a verificação de falhas de isolamento mais grosseiras, ficando a identificação dos defeitos menos pronunciados a cargo dos ensaios, tensão aplicada e tensão induzida.

Finalmente, acrescenta-se que o ensaio com o megôhmetro é utilizado em muitos casos para a verificação do comportamento do isolante com o decorrer do tempo. Para tanto, ao se efetuar a manutenção preventiva ou mesmo corretiva de um certo equipamento, anotam-se a resistência de isolamento medida e o valor do tempo decorrido entre a instalação do equipamento e as diversas manutenções ao qual foi submetido. Ao longo dos anos, têm-se na ficha de cada componente do sistema as diversas resistências e os correspondentes tempos de funcionamento. Esses elementos dão informações a respeito do comportamento do isolamento, com o decorrer do tempo, permitindo pelo traçado de uma curva $R_i = f(\text{tempo de funcionamento})$ uma previsão de até quando o equipamento poderá permanecer em funcionamento, sob o aspecto do isolamento.

4. TENSÃO APLICADA

Como já se observou anteriormente, um megôhmetro com características como as desejadas nas especificações seria bastante difícil de se obter. Para que se faça uma análise real do isolamento entre os enrolamentos e entre os mesmos e a massa, necessita-se aplicar ao transformador uma tensão tal que corresponda no mínimo à nominal, a uma frequência também nominal.

O ensaio de tensão aplicada é realizado como indica a Fig. 8.4. O conjunto a ser utilizado consistirá em uma fonte de tensão de frequência igual à nominal do transformador, que alimenta um transformador de saída variável. A tensão de saída é graduada para um valor que está relacionado com a classe de isolamento do transformador, segundo se verifica pela terceira coluna da Tab. 9.1, do Cap. 9. No ensaio, os terminais dos enrolamentos, segundo se nota pela Fig. 8.4, são curto-circuitados e a alimentação é feita inicialmente pela TS, aterrando-se os terminais de baixa tensão e a massa. Na segunda fase do ensaio, a alimentação é realizada pela baixa tensão, estando a alta e a massa aterradas. Deve-se observar que as tensões são diferentes nas duas etapas do ensaio, pois o valor da tensão depende da classe de tensão do enrolamento em teste, a qual é diferente para a alta e baixa tensão.

Constata-se que, para cada fase do ensaio, os terminais do enrolamento testado estão em curto-circuito. Isso implica que todos os pontos da bobina estão ao mesmo potencial. Este fato leva à conclusão de que o ensaio em pauta permite analisar o isolamento entre as bobinas de alta tensão, baixa e a massa, sendo que o isolamento entre espiras novamente não foi verificado.

Em relação à maneira de constatar a existência ou não de defeitos, o amperímetro indicado já o detectaria, pois uma sua indicação de corrente só ocor-

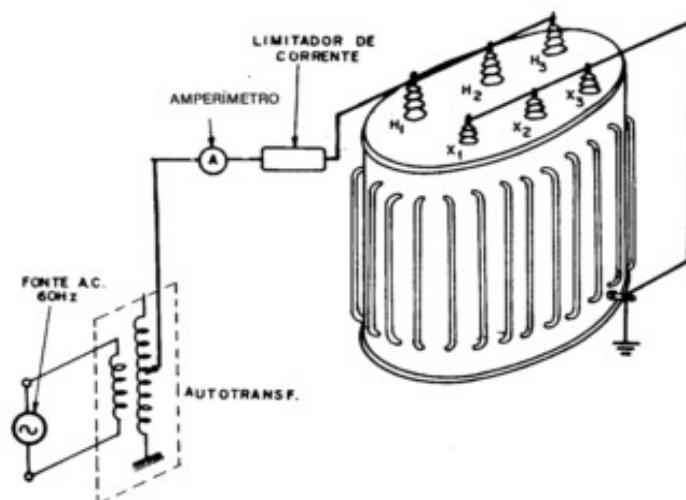


Figura 8.4 — Montagem do conjunto para o ensaio de tensão aplicada

reria se houvesse um circuito fechado através do isolamento, conforme se nota pela Fig. 8.4.

Especifica-se que a leitura no amperímetro não deve ser superior a 1 mA, ou então que a isolamento mínima entre as partes constituintes citadas deve ser de 1 000 Ω para cada 1 V de tensão aplicada. Por exemplo, em transformadores ensaiados com 10 000 V, a resistência mínima do isolamento deve ser 10 M

ohms. Este critério de avaliar a resistência de isolamento é algumas vezes aplicado também a máquinas rotativas.

Em relação à duração do ensaio, verificou-se que, com 1 min., caso haja o defeito, o mesmo já se manifesta, ficando deste modo o citado valor padronizado. A frequência deverá ser igual à nominal ou no mínimo 80% desta.

5. TENSÃO INDUZIDA

Como já se mencionou anteriormente, os ensaios com o megôhmetro e de tensão aplicada têm por finalidade a verificação do isolamento entre os enrolamentos de alta e baixa tensão, e entre ambas e a massa. Entretanto, é fato conhecido que poderá ocorrer defeitos de isolamento entre as próprias espiras de um enrolamento. Como se indica na Fig. 8.5, de acordo com o gradiente ΔV , poderá haver o rompimento do dielétrico, desde que o isolante não o suporte.

Para a realização do ensaio, emprega-se o transformador na condição em vazio, aplicando-se entre os terminais, pelo lado da baixa, uma tensão igual ao dobro da nominal durante um tempo correspondente a 7 200 ciclos. No lado da alta tensão, haverá o dobro da nominal e com isso o gradiente de potencial entre espiras também duplicaria, de tal modo que, se houver um defeito em

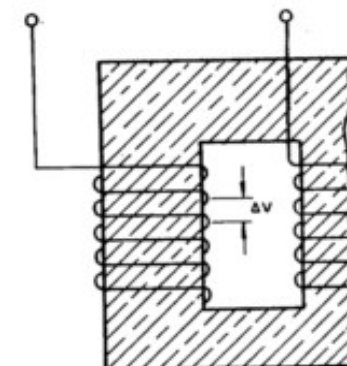


Figura 8.5 — Ensaio de tensão induzida. Análise do isolamento entre espiras

sua isolamento, o mesmo se revelaria dentro do tempo implicitamente fixado em termos do número de ciclos citado.

Uma nota importante a respeito do ensaio é que deve ser observado um valor máximo da corrente de excitação igual a 30% da corrente nominal do enrolamento ao qual se aplica a fonte. Um alto valor de corrente aqueceria o enrolamento e a temperatura afetaria o isolamento. Veja, então, como resolver o problema:

Sabe-se que o valor da tensão induzida é do tipo

$$V \approx k_1 B f \quad (8.7)$$

Conclui-se que, para dobrar a tensão, poder-se-ia dobrar B , porém como se mostra na Fig. 8.6, a saturação seria muito grande e, por consequência, a corrente de excitação seria alta. O que se faz então é aumentar a frequência.

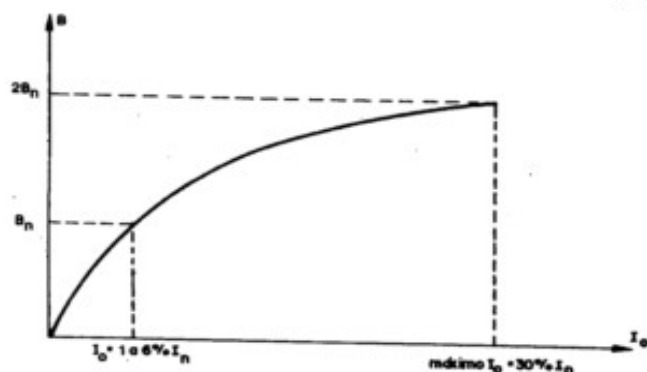


Figura 8.6 — Obtenção do dobro da tensão nominal pelo aumento da indução magnética

Em muitos casos, o aumento chega ao dobro da frequência nominal e, nesses casos, a indução continua igual àquela de funcionamento nominal assim como a corrente a vazio.

Conhecida a frequência, para o cálculo da duração do ensaio, em segundos, vem:

$$T = \frac{7\,200}{f} \text{ (segundos)}$$

Que, no caso de $f = 120 \text{ Hz}$, vem ser igual a 1 min.

Em relação ao esquema, é o mesmo utilizado no ensaio a vazio, e o problema da detecção de defeitos seria efetuado mais segundo a prática do encarregado do teste, sendo que as características para um defeito grosseiro seria alteração da relação de transformação, e os menores, por fumaça ou mesmo bolhas na superfície do óleo.