



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) PI 0905372-7 A2



(22) Data do Depósito: 03/04/2009

(43) Data da Publicação Nacional: 11/08/2020

(54) Título: "LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA PARA INCORPORAÇÃO EM UM CIRCUITO ELÉTRICO"

(51) Int. Cl.: H02H 9/02; H01F 29/14.

(30) Prioridade Unionista: 03/04/2008 AU 2008901584; 16/03/2009 AU 2009901138.

(71) Depositante(es): ZENERGY POWER PTY LTD..

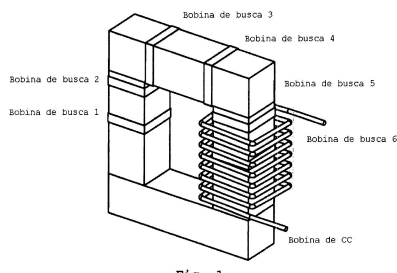
(72) Inventor(es): FRANCIS ANTHONY DARMANN.

(86) Pedido PCT: PCT AU2009000409 de 03/04/2009

(87) Publicação PCT: WO 2009/121143 de 08/10/2009

(85) Data da Fase Nacional: 01/06/2010

(57) Resumo: LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA PARA INCORPORAÇÃO EM UM CIRCUITO ELÉTRICO, Trata-se de um limitador de corrente de fuga (FCL) que inclui uma série de pinos de lata permeabilidade (i) para definir coletivamente um núcleo para FCL. uma bobina de CC (2), com a finalidade de saturar uma parte dos pinos de alta permeabilidade (i), circunda a estrutura completa fora de um invólucro na forma de um vaso (3) contem um meio de isolamento dielétrico (4). As bobinas de CA (5), para transportar a corrente de AC, são enroladas em torno de formadores de isolamento (6) e interconectada eletricamente uma a outra de uma maneira tal que os sentidos do campo magnético produzido por cada bobina de CA (5) no núcleo de alta permeabilidade correspondente são opostos. Há barreiras de isolamento (7) entre as fases para melhorar as propriedades de suporte dielétricos do meio dielétricos



LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA PARA INCORPORAÇÃO EM
UM CIRCUITO ELÉTRICO

CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção refere-se a um limitador de
5 corrente de fuga.

A invenção foi desenvolvida principalmente para um
limitador de corrente de fuga de núcleo saturado de alta
voltagem e será descrita com referência a essa aplicação. No
entanto, a invenção não é limitada a esse campo de uso em
10 particular e também é apropriada para limitadores de corrente
de fuga de baixa voltagem, de média voltagem, de voltagem
extra-alta e de voltagem ultra-alta.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

Os limitadores de corrente de fuga de núcleo
15 saturado (FCLs) são conhecidos. Os exemplos de dispositivos
limitadores de corrente de fuga supercondutores incluem:

- Patente Norte-americana 7.193.825 concedida a
Darmann et al.
- Patente Norte-americana 6.809.910 concedida a
20 Yuan et al.
- Patente Norte-mericana 7.193.825 concedida a
Boenig.
- Publicação de pedido de patente norte-
americana número 2002/0018327, de Walker et al.

25 Os limitadores de corrente de fuga descritos são
para o uso com arranjos de bobinas de cobre do tipo
isolamento a seco e, em termos práticos, são apenas
apropriados para os FCLs saturados de corrente contínua, os
quais empregam o ar como meio de isolamento principal. Isto
30 é, o meio de isolamento estático principal entre as bobinas
de fase de CA em um FCL polifásico e entre as bobinas de fase
de CA e o núcleo de aço, a bobina de DC, o criostato e a
estrutura principal é provido por uma distância apropriada no

ar. Isto limita substancialmente o FCL a tecnologias de isolamento de um "tipo seco". As tecnologias do tipo seco normalmente se referem àquelas técnicas de construção de transformador que empregam bobinas de cobre isoladas eletricamente, mas somente materiais de barreira de isolamento de ar estático normal e sólidos isolados como restante do meio de isolamento. De maneira geral, o ar forma a maior parte do material elétrico de isolamento entre o lado de alta voltagem e os componentes aterrados do FCL. Esses componentes aterrados incluem a estrutura de aço e o invólucro.

A utilização do isolamento do tipo seco limita o FCL a faixas de voltagens menores de voltagens de linha de CA de até aproximadamente 39 kV. Os transformadores e reatores do tipo seco são apenas comercialmente disponíveis até níveis da voltagem de aproximadamente 39 kV. Em consequência disto, a tecnologia demonstrada atual para os FCLs saturados de corrente contínua não é apropriada para a extensão em versões de alta voltagem. Os projetos do tipo seco resultam em uma inabilidade de projetar uma estrutura compacta praticamente dimensionada utilizando o ar como um meio de isolamento quando se trata de voltagens mais altas.

Um dos principais mercados emergentes para os FCLs é a faixa de média a alta voltagem (33 kV a 166 kV) e de voltagem extra-alta (166 kV a 750 kV). Ao operar nessas faixas de voltagem, as descrições do estado da técnica e da literatura atualmente descritas de FCLs saturados de corrente contínua não são práticas. A razão principal é devido às considerações do projeto de voltagem estática - por exemplo, a ruptura do meio de isolamento de ar entre as bobinas de cobre de alta voltagem e o criostato ou núcleo de aço ou bobina de corrente contínua. As bobinas de fase de alta voltagem de média a alta voltagens (maiores do que 39 kV)

precisam ser frequentemente imersas em um dentre:

- um gás isolante (tal como SF₆, nitrogênio ou similar)

- um espaço vazio (melhor do que 10⁻³ mbar)

- um líquido tal como um óleo de silicone sintético, óleo vegetal ou outros óleos isolantes normalmente disponíveis utilizados na tecnologia de transformadores e reatores de média tensão, alta tensão e tensão extra-alta.

Quando um dispositivo de alta tensão é imerso em tal meio isolante, esse meio é normalmente indicado como "meio de isolamento espesso" ou "dielétrico".

Tipicamente, o dielétrico terá uma permissividade relativa da ordem de aproximadamente 2 - 4, exceto para um vácuo que tenha uma permissividade relativa igual a 1. Esses chamados meios de isolamento dielétricos têm propriedades de resistência à ruptura eletrostática que são muito superiores às daquelas do ar atmosférico se forem empregados criteriosamente ao limitar a distância máxima entre as barreiras de isolamento sólidas e ao otimizar a distância dielétrica preenchida com respeito às propriedades de ruptura do dielétrico líquido ou gasoso particular.

Os gases isolantes espessos e os líquidos normalmente disponíveis têm tipicamente uma resistência à ruptura da ordem de 10 a 20 kV/mm, mas são normalmente empregados de maneira tal que a tensão média do campo elétrico não excede aproximadamente 6 - 10 kV/mm. Esta margem de segurança até o valor da tensão de ruptura é requerida porque mesmo se a tensão média do campo eletrostático for de 6-10 kV/mm, a tensão do campo eletrostático de pico ao longo de qualquer linha de campo elétrico isostático pode ser duas a três vezes a média devido a vários efeitos de intensificação do campo eletrostático.

De maneira geral, há cinco requisitos desejáveis principais de um líquido ou gás dielétrico para os requisitos de isolamento espesso de alta voltagem na usina abrigada, tais como transformadores e reatores e limitadores de corrente de fuga:

- O dielétrico deve exibir uma resistividade muito alta,

- As perdas dielétricas devem ser muito baixas,

- O líquido deve poder acomodar isoladores sólidos sem degradar esse isolamento sólido (por exemplo, o isolamento de volta a volta nos enrolamentos de bobina ou epóxi),

- A resistência à ruptura elétrica deve ser elevada, e

- O meio deve poder ser capaz de remover as perdas de energia térmica.

As técnicas de isolamento sólido ainda não estão normalmente disponíveis a média a alta voltagens (isto é, voltagens de operação maiores do que 39 kV) para dispositivos abrigados tais como transformadores, reatores e limitadores de corrente de fuga. O inconveniente das técnicas de isolamento sólido é a presença dos espaços vazios inevitáveis dentro do volume do isolamento sólido ou entre superfícies de materiais dissimilares, tal como entre o isolamento da bobina e outros materiais de isolamento sólido. É bem sabido que os espaços vazios no isolamento sólido com altas voltagens produzem uma tensão elétrica elevada dentro do espaço vazio devido ao efeito de intensificação do campo. Isto causa a ruptura física do material circundante devido às descargas parciais e pode eventualmente conduzir ao trilhamento e à falha total do dispositivo.

Será reconhecido que um limitador de corrente de fuga saturado de CC que emprega uma única bobina ou múltiplas

bobinas de CC para saturar o núcleo de aço, tais como aqueles apresentados na técnica anterior acima mencionada, acarreta problemas fundamentais quando as bobinas de fase de CA de cobre não podem mais ser de uma construção do "tipo seco" ou quando o meio de isolamento principal do dispositivo completo é o ar. Um problema significativo em tais arranjos é a presença do criostato de aço para refrigerar a bobina de HTS de CC e a própria bobina de HTS de CC. O criostato e a bobina e os núcleos de aço estão essencialmente ao potencial de aterramento com respeito às bobinas de fase de AC.

Como uma questão colateral, mas que intensifica os requisitos de isolamento para toda usina e equipamento de alta voltagem, é que o projeto de isolamento básico também deve satisfazer a determinados padrões de engenharia elétrica que testam quanto à tolerância aos vários tipos de sobretensão e impulsos de descarga elétrica por períodos de tempo predeterminados. Um exemplo, na Austrália, de tais padrões é tal como segue:

- AS2374 Parte 3. Níveis de isolamento e testes dielétricos que incluem os testes de frequência de potência (PF) e de impulso de descarga elétrica (LI) do transformador completo.

- AS2374 Parte 3.1. Níveis de isolamento e testes dielétricos - Afastamentos externos no ar

- AS2374 Parte 5. Capacidade de suportar curto-circuito.

Estes padrões não formam uma lista exaustiva dos padrões que o equipamento elétrico de alta voltagem deve satisfazer. É reconhecido o fato de que cada país tem seus próprios padrões que cobrem estas mesmas áreas de projeto, e a referência ao padrão de um país individual não exclui necessariamente os padrões de nenhum outro país. Idealmente, um dispositivo é construído para satisfazer aos padrões de

múltiplos países.

A aderência a estes padrões resulta em um BIL (nível de isolamento básico) para o dispositivo ou um "DIL" (nível de isolamento de projeto) que é normalmente um múltiplo da linha de voltagem de CA básica. Por exemplo, um transformador de média voltagem de 66 kV ou um outro dispositivo abrigado tal como um FCL pode ter um BIL de 220 kV. O requisito para satisfazer a este padrão resulta em um projeto de voltagem estática que é mais difícil de satisfazer do que praticamente uma consideração da voltagem de linha de CA apenas. Os padrões aplicáveis e este requisito resultaram do fato de que uma instalação elétrica prática experimenta sobretensões temporárias que a usina e os dispositivos podem experimentar dentro de uma rede complexa, por exemplo, sobre voltagens de descarga elétrica e surtos de comutação. Desse modo, todo o equipamento em uma rede elétrica tem um BIL ou um DIL apropriado para as voltagens transientes do pior caso previsto.

Uma consideração inicial do problema de projeto estático para limitadores de corrente de fuga saturados de CC de alta voltagem pode resultar na conclusão de que o problema é facilmente resolvido ao abrigar somente as bobinas de cobre de CA de alta voltagem em um gás ou líquido isolante elétrico apropriado. No entanto, o problema com esta técnica é que o núcleo de aço deve passar através do recipiente que contém o gás ou o líquido. O desenho desta interface para o funcionamento de longa duração é difícil de resolver mecanicamente. No entanto, mais importante ainda, a resolução do problema da interface é eletrostaticamente muito mais complexo e qualquer solução pode ser suscetível a falhas ou então provar ser dispendiosa. O problema é que um lacre deve ser desenvolvido entre o vaso que contém o fluido dielétrico e o núcleo de alta permeabilidade ou, alternativamente, um

método de isolar o criostato de HTS do fluido.

Uma outra possibilidade é o uso de barreiras de alta voltagem sólidas entre as fases e entre as fases e o núcleo de aço e o criostato ou uma camada de isolamento de alta voltagem em torno das bobinas de fase de cobre e em contato íntimo com as bobinas de fase. No entanto, isto tem um efeito colateral prejudicial significativo. É sabido que o campo elétrico estático em uma combinação de ar e outros materiais com uma permissividade relativa mais elevada é que isto sempre resulta em um campo elétrico intensificado no material ou fluido com a permissividade mais baixa (ou seja, o ar). Por exemplo, consideremos um cilindro de cobre condutor com uma camada de isolamento normal para representar o isolamento de volta a volta, de acordo com a equação 1.

$$E_1 = \frac{U_1}{x \cdot \left[\frac{\ln\left[\frac{R}{r}\right]}{\epsilon_1/\epsilon_2} + \frac{\ln\left[\frac{d}{R}\right]}{1} \right]}$$

onde:

- U_1 = Voltagem de fase de CA com respeito à terra

- R = raio de um cilindro de cobre incluindo o isolamento externo [mm]

- r = raio do cilindro de cobre desencapado [mm]

- d = distância do centro do cilindro ao plano da terra mais próximo [mm]

- ϵ_2 = constante dielétrica relativa do isolamento que cobre o cilindro

- ϵ_1 = constante dielétrica relativa do isolamento espesso onde o cilindro é imerso (= 1 para o ar)

- x = distância do centro do cilindro a um ponto fora do cilindro [mm]

- E_x = Gradiente do campo eletrostático no ponto x [kV/mm].

O efeito de intensificação do campo é representado pelo fator ϵ_2/ϵ_1 e é da ordem de 2 a 4 para os materiais rotineiros comuns, exceto para o caso do emprego de um vácuo que tenha uma permissividade relativa igual a 1. Desse modo, ao empregar material de isolamento sólido ou um outro adicional (de permissividade elétrica maior do que o ar), é aumentada a tensão eletrostática no isolamento de ar espesso do FCL. Quanto melhor a qualidade do isolamento de alta voltagem, maior o efeito de intensificação do campo.

Desse modo, as barreiras de isolamento dielétrico sólido em um outro FCL isolado a ar não é uma opção tecnicamente desejável para os FCLs de alta voltagem a mais de 39 kV e realmente não se vê esta técnica sendo empregada para produzir transformadores do tipo seco de alta voltagem a mais de 39 kV, por exemplo. De fato, nenhuma técnica foi considerada como altamente apropriada até a presente data e é por isso que os transformadores de alta voltagem acima de 39 kV são isolados com um gás ou líquido dielétrico.

A discussão acima é a razão pela qual o equipamento elétrico de alta voltagem abrigado é frequentemente imerso completamente em um fluido ou gás dielétrico eletricamente isolante. Isto é, as bobinas de cobre isoladas e o núcleo de aço dos transformadores e dos reatores são abrigados dentro de um recipiente que é então preenchido completamente com um meio dielétrico que é um fluido. Isto reduz substancialmente os problemas de projeto de voltagem eletrostática detalhados na discussão acima. O meio isolante (por exemplo, óleo, vácuo ou SF6) preenche todos os espaços vazios e as distâncias inteiras entre os componentes de alta voltagem e os componentes que estão essencialmente no potencial de aterramento ou neutro. Neste caso, barreiras de isolamento

sólidas podem ser incorporadas no dielétrico isolante espesso e, para muitos líquidos tais como o óleo, a divisão das grandes distâncias com isolamento sólido melhora a qualidade do isolamento eletrostático total ao aumentar a resistência do campo à ruptura do fluido dielétrico. Isto ocorre porque a permissividade relativa do óleo e do isolamento sólido são bastante próximas uma da outra (de modo que os efeitos de intensificação do campo são diminuídos em comparação ao ar) e a voltagem de ruptura do meio dielétrico espesso (expressa em kV/mm) melhora para as distâncias menores entre as barreiras de isolamento.

O principal problema com a técnica de imersão total é que ela não é prontamente adaptável aos projetos de um FCL saturado de CC ou a outros dispositivos que incorporaram uma bobina supercondutora como elemento de saturação de CC. Isto ocorre porque a bobina supercondutora e seu criostato ou vaso de vácuo são um componente do FCL que também deve ser necessariamente imerso no fluido dielétrico.

A literatura estabelecida aponta claramente para quatro critérios principais para um FCL que pode ser comercializado, realizável e fabricado:

- Deve ter uma impedância de baixa inserção de modo que seja invisível à rede quando não houver fugas e ao conferir um fluxo de energia de pico.

- Não deve produzir mais de 0,5% de valor de THD de harmônicos (distorção harmônica total) ou tal como requerido pelo usuário final.

- Deve fornecer um corte apropriado da corrente de fuga, entre 20 e 80%.

- O projeto deve poder ser aumentado para altas voltagens de CA (maiores do que 6 kV) e para alta corrente de CA (maior do que 0,6 kA).

Os projetos de FCL de núcleo saturável clássicos

detalhados na técnica anterior apresentam os grandes inconvenientes de não serem apropriados para projetos de alta voltagem e de alta corrente de CA. Essas duas desvantagens se originam da falta de um refrigerante (que não seja o ar) e/ou
5 de um dielétrico líquido ou gasoso.

Mesmo se um dielétrico líquido ou gasoso for empregado no projeto de FCL saturável clássico, há ainda um aumento significativo necessário para permitir acesso ao criorefrigerante, ao criostato e aos acessórios do criostato.
10 Além disso, lacres especiais para isolar as alimentações de passagem do criostato (energia elétrica, sinais elétricos) do dielétrico têm que ser feitos e testados.

Em projetos de alta corrente de AC, a área em seção transversal de cobre necessária para conduzir a corrente elétrica requerida é muito maior ao considerar somente um
15 projeto refrigerado a ar. Não é incomum que essa área em seção transversal seja até cinco vezes maior. Isto pode tornar as dimensões da bobina de CA muito grandes para ela ser acomodada no tamanho de jugo da estrutura do núcleo
20 mínimo, precisando de um jugo maior para manter o afastamento eletrostático. Isto aumenta a área e a massa do FCL saturável refrigerado a ar/isolado a ar clássico.

Qualquer discussão acerca da técnica anterior por todo o relatório descritivo não deve, de maneira nenhuma, ser
25 considerada como uma admissão de que tal técnica anterior é amplamente conhecida ou que forma parte do conhecimento geral comum no campo.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DA INVENÇÃO

É objetivo das realizações preferidas da presente
30 invenção incrementar uma ou mais das desvantagens acima mencionadas ou apresentar uma alternativa útil.

É um outro objetivo das realizações preferidas da invenção superar uma ou mais das desvantagens indicadas

acima, invertendo as posições relativas convencionais das bobinas de CA e de CC com um FCL. Essas realizações permitem que toda a estrutura fique imersa em um dielétrico.

De acordo com um primeiro aspecto da invenção, é
5 apresentado um limitador de corrente de fuga de alta voltagem que inclui um núcleo saturável magneticamente e pelo menos uma bobina de fase de CA enrolada em torno de uma parte do dito núcleo saturável, sendo que o dito núcleo saturável magneticamente e pelo menos uma dita bobina de fase de CA são
10 abrigados dentro de um invólucro e uma bobina de polarização de CC é disposta fora e em torno do dito invólucro, o qual, durante condições de operação sem falha do dito limitador de corrente, polariza o dito núcleo em saturação magnética para uma impedância de inserção sem falha de um estado estável
15 baixo, mas durante condições de falha, tira o dito núcleo da saturação magnética, conferindo desse modo uma impedância de limitação de corrente aumentada no dito circuito elétrico.

Em uma realização, o núcleo de alta permeabilidade é selecionado dentre um ou mais de um material de laminação
20 de aço de transformador, de um aço doce ou de outras formas de aço magnético, de materiais de ferrita ou de um material ferromagnético.

Em uma realização, o núcleo está na forma de uma disposição retangular de pinos do núcleo com as bobinas de
25 fase de CA enroladas um cada um dos respectivos pinos do núcleo e interconectadas eletricamente de uma maneira tal que os sentidos dos campos magnéticos produzidos pelas bobinas de CA sejam opostos.

Em uma realização, o limitador de corrente de fuga
30 inclui um vaso que circunda as bobinas de CA para conter um meio de isolamento dielétrico e um meio de refrigeração para as ditas bobinas de AC.

Em uma realização, a bobina de CC é um

supercondutor e, mais preferivelmente, um supercondutor de alta temperatura abrigado em um criostato e refrigerado por um criorefrigerante.

Em uma realização, a bobina de polarização de CC coincide com uma bobina coaxial com as bobinas de fase de CA de modo que a dita parte do núcleo saturável seja inteiramente saturada.

Em uma realização, o núcleo magneticamente saturável e as bobinas de CA são imersos em um dielétrico que está na forma de um sólido, líquido ou gás e que inclua ar em qualquer atmosfera, incluindo o vácuo.

Em uma realização, os pinos do núcleo têm uma seção transversal retangular e uma seção transversal constante ao longo dos comprimentos dos mesmos.

Em uma realização, o núcleo magneticamente saturável é construído de um material de laminação de aço de transformador, de um aço doce ou de outro aço magnético, de material de ferrita, de um pó comprimido de alta permeabilidade isolado ou de um material ferromagnético.

Em uma realização, os pinos do núcleo são afunilados na direção das extremidades dos mesmos, com o que, durante uma operação sem falha do limitador de corrente, substancialmente todo o dito núcleo é saturado.

De acordo com um segundo aspecto da invenção, é apresentado um limitador de corrente de fuga que inclui:

um terminal de entrada para se conectar eletricamente a uma fonte de energia que fornece uma corrente de carga;

um terminal de saída para se conectar eletricamente a um circuito de carga que extrai a corrente de carga;

um núcleo saturável magneticamente;

uma bobina de CA enrolada em torno de uma parte longitudinal do núcleo para conduzir a corrente de carga

entre o terminal de entrada e o terminal de saída; e

pelo menos uma bobina de CC para induzir um campo magnético em pelo menos parte do núcleo e que se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de AC, sendo que o campo polariza magneticamente o núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

Em uma realização, no estado de baixa impedância, a parte é magneticamente saturada.

Em uma realização, no estado de baixa impedância, o núcleo é magneticamente saturado longitudinalmente além da parte.

Em uma realização, no estado de alta impedância, a parte está fora da saturação magnética.

Em uma realização, no estado de baixa impedância, a impedância da bobina de CA é substancialmente igual à impedância do núcleo de ar teórica da bobina de AC.

Em uma realização, uma dentre uma ou mais características é um aumento da corrente de carga além de um valor de corrente predeterminado.

Em uma realização:

o núcleo inclui uma pluralidade de pinos;

a parte longitudinal é segmentada entre os pinos; e

a bobina de CA inclui uma pluralidade de segmentos de bobina que ficam enrolados em torno dos respectivos pinos.

Em uma realização, os pinos são paralelos.

Em uma realização, os pinos se estendem longitudinalmente.

Em uma realização, cada pino tem uma seção transversal transversa substancialmente uniforme.

Em uma realização, os pinos têm seções transversais transversas substancialmente parecidas.

Em uma realização, a seção transversal transversa dos pinos tem pelo menos um eixo de simetria.

Em uma realização, as seções transversais transversas dos pinos são simétricas.

5 Em uma realização, os pinos se coestendem substancialmente dentro da zona intermediária.

Em uma realização, os pinos são espaçados uns dos outros.

10 Em uma realização, os pinos se estendem longitudinalmente além das bobinas de DC.

Em uma realização, os segmentos de bobina se coestendem substancialmente longitudinalmente na zona intermediária.

15 Em uma realização, a bobina de CA se estende longitudinalmente além das bobinas de DC.

Em uma realização, cada pino se estende longitudinalmente além da respectiva bobina de AC.

20 Em uma realização, a corrente de carga inclui três fases e o limitador de corrente de fuga inclui três pares de terminais de entrada e de terminais de saída para as respectivas fases.

25 Em uma realização, o limitador de corrente de fuga inclui seis pinos arranjados em três pares, onde cada par de pinos é associado com um respectivo par de terminais de entrada e de saída para conduzir a fase de corrente de carga correspondente.

Em uma realização, os pinos em cada par de pinos são bifucados conjuntamente.

30 Em uma realização, cada pino inclui extremidades longitudinais, e pelo menos uma extremidade de cada pino é bifurcada para uma extremidade adjacente do outro pino no mesmo par.

Em uma realização, as duas extremidades de cada

pino são bifurcadas para as extremidades adjacentes respectivas do outro pino no mesmo par.

Em uma realização, os pinos são bifurcados magnética e fisicamente por um material de alta permeabilidade.

Em uma realização, os pinos em cada par são adjacentes um ao outro e incluem faces opostas espaçadas entre si.

Em uma realização, as faces opostas são substancialmente planares.

Em uma realização, as faces opostas são substancialmente paralelas.

Em uma realização, as faces opostas são substancialmente coextensivas.

Em uma realização, o limitador de corrente de fuga inclui um invólucro para definir a zona intermediária.

Em uma realização, o invólucro contém um material dielétrico.

Em uma realização, a bobina de CA é recebida dentro do dielétrico.

Em uma realização, cada uma das bobinas de CC inclui um material de alta condutividade.

Em uma realização, o material de alta condutividade é selecionado dentre o cobre, o alumínio, um material supercondutor de alta temperatura e um material supercondutor da baixa temperatura.

De acordo com um terceiro aspecto da invenção, é apresentado um método de limitação de corrente que inclui as etapas de:

provisão de um terminal de entrada para se conectar eletricamente a uma fonte de energia que fornece uma corrente de carga;

provisão de um terminal de saída para se conectar

eletricamente a um circuito de carga que extrai a corrente de carga;

provisão de um núcleo saturável magneticamente;

enrolamento de uma bobina de CA em torno de uma parte longitudinal do núcleo para conduzir a corrente de carga entre o terminal de entrada e o terminal de saída; e

indução de um campo magnético em pelo menos parte do núcleo com pelo menos uma bobina de DC, sendo que a bobina de CC se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de AC, e sendo que o campo polariza magneticamente o núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

De acordo com um quarto aspecto da invenção, é apresentado um limitador de corrente de fuga que inclui:

um terminal de entrada para se conectar eletricamente a uma fonte de energia que fornece uma corrente de carga;

um terminal de saída para se conectar eletricamente a um circuito de carga que extrai a corrente de carga;

um núcleo saturável magneticamente;

uma bobina de CA enrolada em torno de uma parte longitudinal do núcleo para conduzir a corrente de carga entre o terminal de entrada e o terminal de saída; e

pelo menos uma bobina de CC que esteja em um arranjo de núcleo aberto com a bobina de CA para induzir um campo magnético em pelo menos uma parte do núcleo, e a bobina de CC se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de AC, sendo que o campo polariza magneticamente o núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características

da corrente de carga.

De acordo com um quinto aspecto da invenção, é apresentado um método de limitação de corrente que utiliza um limitador de corrente de fuga, e o método inclui:

5 a conexão elétrica de uma fonte de energia a um terminal de entrada para fornecer uma corrente de carga;

a conexão elétrica de um circuito de carga a um terminal de saída para extrair a corrente de carga;

a provisão de um núcleo saturável magneticamente;

10 a provisão de uma bobina de CA enrolada em torno de uma parte longitudinal do núcleo para conduzir a corrente de carga entre o terminal de entrada e o terminal de saída; e

a provisão de pelo menos uma bobina de CC que esteja em um arranjo de núcleo aberto com a bobina de CA para induzir um campo magnético em pelo menos uma parte do núcleo, e a bobina de CC se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de AC, sendo que o campo polariza magneticamente o núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

De acordo com um sexto aspecto da invenção, é apresentado um limitador de corrente de fuga que inclui:

25 três terminais de entrada para se conectar eletricamente às respectivas fases de uma fonte de energia trifásica que fornece uma corrente de carga trifásica;

três terminais de saída para se conectar eletricamente às respectivas fases de um circuito de carga que extrai a corrente de carga;

30 um núcleo saturável magneticamente que tem três pares de pinos, e cada pino tem uma parte longitudinal;

três bobinas de CA enroladas em torno de torno das partes dos respectivos pares de pinos para conduzir a

corrente de carga entre os terminais de entrada e os terminais de saída; e

pelo menos uma bobina de CC para induzir um campo magnético pelo menos nas partes e que se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe os pinos e as bobinas de AC, sendo que o campo polariza magneticamente o núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

Em uma realização, cada bobina de CA inclui dois segmentos de bobina que são, cada um deles, enrolados em torno das respectivas partes dos pinos no par de pinos.

De acordo com um sétimo aspecto da invenção, é apresentado um método de limitação de corrente que utiliza um limitador de corrente de fuga, e o método inclui as etapas de:

conexão elétrica de três terminais de entrada às respectivas fases de uma fonte de energia trifásica para fornecer uma corrente de carga trifásica;

conexão elétrica de três terminais de saída com as respectivas fases de um circuito de carga para extrair a corrente de carga;

provisão de um núcleo saturável magneticamente que tem três pares de pinos, e cada pino tem uma parte longitudinal;

provisão de três bobinas de CA enroladas em torno das partes dos respectivos pares de pinos para conduzir a corrente de carga entre os terminais de entrada e os terminais de saída; e

provisão de pelo menos uma bobina de CC para indução de um campo magnético pelo menos nas partes e que se estendem sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe os pinos e as bobinas de AC, sendo que o campo polariza

magneticamente o núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

5 De acordo com um oitavo aspecto da invenção, é
4 provido um núcleo para um limitador de corrente de fuga, e o
núcleo inclui pelo menos um pino que se estende
longitudinalmente e que tem pelo menos duas partes que são
saturáveis magneticamente e que, em uso, são recebidas dentro
10 dos respectivos segmentos de bobina de uma bobina de CA que,
por sua vez, é recebida dentro de uma bobina de DC.

Em uma realização, as partes são espaçadas entre si.

Em uma realização, o núcleo inclui dois pinos
15 paralelos parecidos que têm partes respectivas.

Em uma realização, os pinos são bifurcados.

Em uma realização, os pinos são bifurcados um em
relação ao outro.

Em uma realização, cada pino se estende entre uma
20 primeira extremidade e uma segunda extremidade, sendo que a
primeira extremidade e a segunda extremidade de um dos pinos
são adjacentes à primeira e à segunda extremidades,
respectivamente, do outro pino.

Em uma realização, o núcleo inclui um jugo que se
25 estende entre as primeiras extremidades para bifurcar os
pinos um em relação ao outro.

Em uma realização, o núcleo inclui um jugo
adicional que se estende entre as segundas extremidades para
bifurcar os pinos um em relação ao outro.

30 Em uma realização, os pinos incluem laminações de
pino.

Em uma realização, os jugos incluem laminações de
jugo.

Em uma realização, as laminações de pino e as laminações de jugo são intercaladas.

Em uma realização, o núcleo inclui seis pinos que se estendem longitudinalmente arranjados em três pares.

5 De acordo com um nono aspecto da invenção, é apresentado um limitador de corrente de fuga que inclui o núcleo do oitavo aspecto da invenção.

10 De acordo com um décimo aspecto da invenção, é apresentado um sistema de distribuição elétrica que inclui pelo menos um limitador de corrente de fuga de um dentre o primeiro, o segundo, o quarto, o sexto e o nono aspectos da invenção.

15 Por todo este relatório descritivo, a referência a "uma realização", a "algumas realizações" ou a "a realização" significa que um aspecto, estrutura ou característica em particular descritos em relação à realização estão incluídos em pelo menos uma realização da presente invenção. Desse modo, o aparecimento das frases "em uma realização", "em algumas realizações" ou "na realização" em vários lugares por
20 todo este relatório descritivo não necessariamente estão se referindo à mesma realização, mas isso pode ocorrer. Além disso, os aspectos, as estruturas ou as características em particular podem ser combinados de qualquer maneira apropriada, como fica evidente a técnico no assunto a partir
25 desta descrição, em uma ou mais realizações.

Tal como aqui utilizado, a menos que esteja especificado de outra maneira, o uso dos adjetivos ordinais "primeiro", "segundo", "terceiro" etc. para descrever um
30 objetos semelhantes estão sendo apresentados, e não se pretende sugerir que os objetos assim descritos devam estar em uma dada sequência, tanto temporal, espacial ou de classificação, ou de qualquer outra maneira.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

As realizações atualmente preferidas da invenção serão descritas agora com referência aos desenhos anexos a seguir, em que:

5 a Figura 1 é uma vista esquemática de uma estrutura de núcleo de FCL experimental;

a Figura 2 ilustra os resultados de uma análise da FEA em relação à estrutura da Figura 1;

10 a Figura 3 ilustra uma estrutura de núcleo fechado para um FCL com uma bobina de CA e uma bobina de CC sobrepostas e coaxiais - isto é, as duas bobinas são enroladas em torno do mesmo membro do núcleo fechado;

15 a Figura 4 ilustra uma estrutura de núcleo fechado experimental com as bobinas de busca associadas para permitir uma investigação da natureza da impedância de inserção;

a Figura 5 é uma ilustração dos resultados da experiência realizada com a estrutura da Figura 4;

a Figura 6 resume os resultados da impedância de inserção medidos para as estruturas experimentais acima;

20 a Figura 7 é uma vista em seção transversal esquemática de um limitador de corrente de fuga de núcleo aberto trifásico, de acordo com a dita invenção;

25 a Figura 8 é uma vista esquemática da interconexão elétrica dos enrolamentos em dois dos pinos do núcleo mostrados no limitador de corrente de fuga da Figura 7;

a Figura 9 mostra os resultados da análise da FEA do campo magnético e da permeabilidade relativa através do comprimento de um núcleo na direção Z da Figura 7;

30 a Figura 10 mostra um gráfico do campo magnético ao longo de uma linha central em relação os núcleos e três pinos de núcleo que se cruzam na direção X da Figura 7;

a Figura 11 mostra um gráfico do campo magnético no centro de um único pino do núcleo da Figura 7 com energização

de corrente de DC;

a Figura 12 mostra um gráfico da magnetização de CC do núcleo da Figura 7 com pequenas excursões de CC em torno de dois pontos de operação saturados de outra maneira;

5 a Figura 13 mostra um gráfico da permeabilidade relativa no meio de um pino do núcleo da Figura 7 com respeito à energização da bobina de CC e com 1.000 amperes de corrente na bobina de CA de 50 voltas;

10 a Figura 14 mostra um gráfico da magnetização de CC do núcleo da Figura 7 como uma função dos amperes-voltas de CC com a corrente de CA completa na bobina de CA de maneira tal que os fluxos produzidos por cada um sejam opostos;

15 a Figura 15 é uma forma alternativa da invenção que mostra a mesma interconexão de enrolamento e que o jugo inferior entre os dois núcleos está retido;

a Figura 16 mostra um arranjo de um projeto de FCL de núcleo aberto trifásico com três fileiras e duas colunas de núcleos de aço e com interconexões elétricas em cada fase de acordo com o detalhado na Figura 8;

20 a Figura 17 mostra um arranjo alternativo do projeto de FCL de núcleo aberto trifásico com duas fileiras e três colunas de núcleos de aço e com interconexões elétricas em cada fase de acordo com o detalhado na Figura 8;

25 a Figura 18 mostra uma alternativa bifurcada do FCL de núcleo aberto trifásico e com interconexões elétricas em cada fase, de acordo com o detalhado na Figura 8;

30 a Figura 19 mostra o arranjo experimental empregado para medições de densidade de fluxo e impedância de inserção sem falha de estado estável de CA e a caracterização da limitação da corrente de fuga e com interconexões elétricas em cada fase de acordo com o detalhado na Figura 8;

a Figura 20 mostra as características da impedância de inserção sem falha medidas para o arranjo experimental de

FCL de núcleo aberto;

a Figura 21 mostra as características da impedância de inserção de estado estável sem falha em diferentes tensões e correntes de AC;

5 a Figura 22 mostra gráficos da caracterização da corrente de fuga para um FCL de núcleo aberto como uma função da polarização de DC;

10 a Figura 23 mostra gráficos de caracterização de transiente de densidade de fluxo do arranjo experimental de núcleo aberto;

a Figura 24 mostra um gráfico da tensão de transiente do circuito de CC quando o núcleo está saturado a uma extensão além da região de influência da bobina de AC, e onde a presença da falha é detectada como uma ligeira queda na tensão entre as pontas de seta que começam em $t = 0,08$ segundo;

a Figura 25 mostra gráficos de corrente de fuga de transientes do arranjo experimental com e sem o FCL de núcleo aberto no circuito;

20 a Figura 26 mostra características de corrente de transientes do circuito de CC do arranjo experimental de FCL de núcleo aberto;

a Figura 27 mostra o arranjo experimental das bobinas de CA e de CC para a medição e a caracterização de densidade de fluxo, de impedância de inserção sem falha de CA e da capacidade de limitação de corrente de fuga do FCL bifurcado e com interconexões elétricas em cada fase, de acordo com o detalhado na Figura 8;

30 a Figura 28 mostra a impedância de inserção de estado estável sem falha medida do arranjo experimental do FCL bifurcado de núcleo aberto comparada àquela medida no FCL de núcleo aberto não bifurcado com os membros de mesmas dimensões;

a Figura 29 mostra a comparação entre a impedância de inserção sem falha medida e os arranjos de núcleo aberto bifurcados e não bifurcados e comparados com os vários arranjos de núcleo fechado;

5 a Figura 30 mostra a impedância de inserção de estado estável sem falha medida do arranjo experimental de FCL de núcleo aberto comparada àquela medida no FCL de núcleo aberto não bifurcado com os membros de mesmas dimensões;

10 a Figura 31 mostra gráficos de caracterização de corrente de fuga para um FCL de núcleo aberto bifurcado como uma função da polarização de DC;

15 a Figura 32 mostra um gráfico de densidade de fluxo do arranjo experimental de FCL de núcleo aberto, tirado de uma bobina de busca em torno de um membro de aço e situada no alto da bobina de CA de um FCL de núcleo aberto bifurcado;

a Figura 33 mostra as características de corrente de transiente de circuito de CC do arranjo experimental de FCL de núcleo aberto bifurcado;

20 a Figura 34 é uma representação esquemática de um FCL em um sistema de distribuição elétrica;

a Figura 35 é uma vista em perspectiva esquemática de um FCL de núcleo aberto monofásico em que o núcleo inclui dois pinos de aço que são empilhados de extremidade a extremidade;

25 a Figura 36 é uma vista superior do FCL da Figura 35;

a Figura 37 é uma vista em perspectiva esquemática de um FCL de núcleo aberto monofásico em que o núcleo inclui um único pino de energia comprimida;

30 a Figura 38 é uma vista superior do FCL da Figura 37;

a Figura 39 é uma vista em perspectiva esquemática de uma realização adicional de um FCL que tem uma área

geralmente circular e que inclui jugos entre os pinos dentro do núcleo; e

a Figura 40 é uma vista superior esquemática do FCL da Figura 39;

5 a Figura 41 é uma vista em perspectiva esquemática de um FCL similar ao da Figura 39 sem os jugos;

a Figura 42 é uma vista superior do FCL da Figura 41;

10 a Figura 43 é uma vista em perspectiva esquemática de um FCL que inclui um núcleo que tem pinos em seção transversal retangulares arranjados em uma disposição 3 x 2 empilhada;

15 a Figura 44 é uma vista em perspectiva esquemática de um FCL que inclui um núcleo que tem pinos em seção transversal retangulares arranjados em uma disposição 3 x 2 de lado a lado; e

20 a Figura 45 é uma vista em perspectiva esquemática de um FCL que inclui um núcleo que tem pinos em seção transversal retangulares arranjados em uma disposição 3 x 2 empilhada que são bifurcados.

DESCRIÇÃO DETALHADA DAS REALIZAÇÕES PREFERIDAS

Embora várias realizações sejam descritas abaixo, realizações adicionais da invenção são apresentadas no Pedido de Patente australiano nº 2009901138, depositado em 16 de 25 março de 2009, e do qual a prioridade é reivindicada. Os detalhes dessas realizações são aqui incorporados expressamente a título de referência remissiva.

30 A descrição a seguir com referência às Figuras 1 a 6 pretende oferecer ao leitor o contexto sobre as realizações da invenção.

Primeiramente, é mencionado que as características paramétricas normalmente utilizadas das realizações preferidas incluem:

- Acore: Área em seção transversal dos núcleos de alta permeabilidade sob a bobina de AC,

- N_{ac} : O número de voltas de AC,

- N_{dc} : O número de voltas de DC,

5 - I_{dc} : A corrente da bobina de CC [amperes],

- I_{ac} : A corrente da bobina de CA [amperes, rms]

- f : A frequência do sistema elétrico,

- Z_b : A impedância base do sistema elétrico que está sendo protegido,

10 - Z_+ : A impedância de sequência positiva do sistema,

- I_{fp} : A corrente de fuga esperada do sistema,

- I_{fr} : A corrente de fuga reduzida desejada.

A limitação da corrente de fuga e a impedância de inserção são funções dos parâmetros acima.

15 É sabido pelos técnicos no assunto que a magnetização de uma estrutura de alta permeabilidade, tal como necessário no campo de FCLs, é propensa a perda de fluxo devido aos dois efeitos principais a seguir:

20 - Delimitação das linhas do campo magnético em torno da bobina de polarização de CC e retorno através de uma passagem puramente de ar.

- Retorno de fluxo de ar/núcleo parcial onde o fluxo entra no núcleo, mas retorna através de uma passagem de ar em vez de uma passagem de alta permeabilidade completa.

25 Por exemplo, uma análise de FEA foi realizada na estrutura de núcleo mostrada na Figura 1. As características relevantes dessa estrutura de núcleo são:

- Dimensão da janela, Largura = 290 mm.

30 - Dimensão da janela, Altura = 350 mm.

- Material: Núcleo de aço laminado M6.

- Laminações empregadas para construir o núcleo: estrutura de núcleo escalonada de 0,35 mm.

- Área em seção transversal de núcleo: 150 mm x 150 mm.

Outros detalhes experimentais são mostrados na Figura 1, e resultados mais completos são mostrados na Figura 2.

Foi descoberto que havia uma perda de densidade de fluxo magnético nos membros e nos jugos afastados. A Tabela 1 abaixo resume os resultados da estrutura de núcleo da Figura 1 no ponto de densidade de fluxo máxima.

Tabela 1: Resultados de densidade de fluxo básica no núcleo protótipo da Figura 1

Localização	Número da bobina de busca empregada	Densidade de fluxo (T)
Centro do membro interno	6	2,12
Membro interno perto da bobina de DC	5	2,07
Jugo superior, perto da bobina de DC	4	2,01
Jugo superior mais distante da bobina de DC	3	2,01
Topo do membro exterior	2	1,96
Centro do membro exterior	1	1,95

O efeito aqui descrito é bem conhecido dos elementos versados na técnica. A redução na densidade do fluxo no lado do núcleo de CA de 2,12 Tesla para 1,95 Tesla não pode, à primeira vista, parecer uma desvantagem. No entanto, é a medição de circuito menor na bobina de CA que revela o problema. Embora o circuito menor da bobina do lado de CC resulte em uma permeabilidade relativa média próxima de 1,0, tal como esperado para um núcleo saturado, o circuito menor medido no mesmo nível da corrente da bobina de CC revela uma permeabilidade relativa de 86. Isto resulta em uma impedância de alta inserção para o dispositivo e também

revela que o núcleo do lado de CA não está inteiramente saturado, apesar da observação do achatamento clássico da curva de B-H.

5 As abordagens para reduzir a perda de densidade de fluxo e manter o lado de CA do núcleo saturado incluem:

- Emprego de uma área em seção transversal maior do núcleo por toda a estrutura.
 - Seções transversais não uniformes de aço.
 - Redução do comprimento magnético total do aço
- 10 entre as bobinas de CA e de CC para produzir uma estrutura de núcleo de perfil baixo.

No entanto, como uma alternativa a essas abordagens, também é prático colocar as bobinas de CA nos membros laterais próximos, tal como mostrado na Figura 3.

15 Empregando esta técnica, a densidade de fluxo nos membros imediatamente abaixo das bobinas de CA é substancialmente a mesma que aquela imediatamente abaixo das bobinas de DC

Durante a operação em estado estável, o fluxo das bobinas de CA deve ser tal que a densidade de fluxo magnético na parte do núcleo de aço sob influência não seja dessaturada ou alterada substancialmente. Isto deve produzir uma impedância de inserção mais alta do que o mínimo possível e causar um teor harmônico no estado estável em forma de onda

20 de CA sem falha.

Durante a atividade de limitação de fuga, o fluxo gerado das bobinas de CA anula aquele no núcleo de aço, dessaturando uma parte do núcleo de aço e fazendo com que a impedância terminal da bobina de CA aumente.

30 Neste arranjo em particular, também deve ser reconhecido que os jugos e membros externos agora não são mais necessários - somente os membros centrais são necessários.

O problema associado com a perda de densidade de fluxo no membro que contém a bobina de CA também é associado com uma impedância de estado estável mais alta no estado sem falha, também conhecido como impedância de inserção. A impedância de inserção associada com uma bobina de CA é diretamente proporcional ao gradiente de densidade de fluxo versus o gráfico de força magneto motiva (MMF). Se a parte do núcleo sob influência da bobina de CA não for inteiramente saturada a um ponto onde esta inclinação é minimizada, então a impedância de inserção será impraticavelmente elevada.

Para ilustrar a natureza da impedância de inserção, um arranjo experimental foi construído na Figura 4 para a sua medição para as várias posições da bobina de CA em um núcleo com respeito à bobina de CC. Um núcleo e uma estrutura de bobina foram construídos com os detalhes mostrados na Tabela 2 e na Tabela 3 abaixo.

Tabela 2

	I.D (mm)	O.D (mm)	Altura (mm)	Nº de volta s	Nº de camada s	Resistênci a (Ohms)	Diâmetr o do fio (mm)
Bobinas de busca			15	25,5	1	1,70	0,5
Bobina de DC	160	184	280	171	3		4,0
Formado r (DC)	150	160	280				
Tamanho interno da janela do núcleo	650 (H) x 450 (W) mm						
Seção do núcleo	100 x 100 mm						

Tabela 3

Fator de preenchimento do	0,96
---------------------------	------

núcleo de ferro	
Medidor de fluxo de integração empregado	Ímã de Walker 25,5 x 0,96 x 100 = 2448
Ajustes do medidor de fluxo	
Bobinas de CC de cobre utilizadas (não supercondutoras)	
Toda a construção de alumínio e suporte - Não foi empregado aço doce	
Bobinas de busca enroladas diretamente de modo firme no núcleo	
Núcleo de aço laminado M6 (espessura das laminações 0,35 mm)	

É agora feita referência à Figura 5. A confirmação de saturação no lado de CC foi feita utilizando bobinas de busca e sondas de Hall. O uso das sondas de Hall acarretou a necessidade de introduzir um espaço vazio de 1,3 mm no núcleo que não tinha sido empregado durante as medições de impedância de inserção.

Outros detalhes do arranjo experimental para a medição da impedância de inserção incluem:

- Corrente de CC = 100 amperes CC.
- Voltagem de CA = 50 V CA.
- Frequência da voltagem e corrente CA.: 50 Hz
- Corrente de CA = 28 amperes CA.
- Voltas de CA = 50
- Resistência da bobina de CA = 0,10 Ohms

A Figura 6 resume os resultados da impedância de inserção medida. A impedância de inserção mínima é obtida com o arranjo de bobina coincidente e com o número mínimo de amperes-voltas na bobina de CC necessário para saturação. Todos os outros arranjos, incluindo aquele em que a bobina de CA está no mesmo membro que a bobina de CC e bastante próxima da bobina de DC, resultam em uma impedância de inserção mais alta.

As medições da impedância de inserção como uma função dos amperes-voltas confirmaram que um núcleo de alta permeabilidade sob influência da bobina de CA não deve apenas

ser saturado, mas deve ser "supersaturado" para ter uma impedância de inserção mínima teórica.

Tal como mostrado na Figura 34, o limitador de corrente de fuga (FCL) fica localizado em uma subestação de distribuição elétrica. O FCL é incluído principalmente para limitar a corrente de fuga de um transformador, o que também é ilustrado. Nos locais em que uma subestação inclui mais de um transformador, é possível ter um FCL separado para cada um dos transformadores. No entanto, em algumas realizações, um número menor do que todos os transformadores de uma subestação têm um FCL associado.

O FCL, no lado a jusante, é conectado eletricamente a um sistema de distribuição elétrica do qual a subestação faz parte.

Em outras realizações, o transformador e o FCL ficam localizados dentro de uma instalação que não uma subestação. Os exemplos indicativos incluem uma rede de distribuição em um local industrial, entre um co-gerador e o restante da grade; e proteção da grade de eletricidade principal da contribuição de corrente de fuga de uma instalação eólica, de um gerador de ondas, de um hidrogerador, ou de uma instalação de energia solar.

Para a realização da Figura 34, a estação de energia é uma estação de energia movida a carvão. No entanto, em outras realizações, a estação de energia é uma ou mais dentre uma hidroestação, uma estação de energia nuclear e uma estação de energia de gerador eólico.

Com referência à Figura 7, há uma série de pinos de alta permeabilidade 1 ilustrados em um arranjo de FCL de núcleo aberto trifásico, de acordo com uma realização da invenção. A direção Z é definida como sendo ao longo da direção longitudinal do núcleo de alta permeabilidade, tal como mostrado. Os pinos são fabricados de laminações de

transformador, e a direção de laminação das laminações é ao longo do eixo Z.

Deve ser apreciado que os pinos 1 definem coletivamente um núcleo para o FCL.

5 Os pinos de alta permeabilidade 1 são de um material de laminação de aço de transformador. Em outras realizações, é feito uso de um ou mais dentre o aço doce ou outras formas de materiais de ferrita de aço magnético ou material ferromagnético ou material granular, tais como um
10 núcleo feito de pó ferromagnético consolidado ou um núcleo vítreo amorfo.

Uma bobina de CC 2, para as finalidades de saturação de uma parte dos pinos de alta permeabilidade 1, circunda a estrutura completa fora do invólucro. O termo
15 "circunda" ou similar é utilizado para descrever como a bobina 2 envolve o invólucro ou o tanque. Isto é, a bobina de CC se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de CA. Nas realizações ilustradas, o núcleo e a bobina ou bobinas de CA bobinas são dispostos
20 dentro de um tanque ou outro invólucro, e a bobina de CC envolve o invólucro. Isto confere diversas vantagens de acondicionamento e de desempenho das realizações preferidas. Como será mencionado abaixo, as zonas intermediárias das realizações são definidas pelos respectivos tanques.

25 Um vaso 3 contém um meio de isolamento dielétrico 4. Este meio também é um meio de refrigeração para as bobinas de CA e pode ser o ar atmosférico ambiente.

Há bobinas de CA 5 para transportar a corrente de CA enrolada nos formadores de isolamento 6 e interconectadas
30 eletricamente uma a outra de maneira tal que os sentidos do campo magnético produzidos por cada bobina de CA no núcleo de alta permeabilidade correspondente sejam opostos.

Há barreiras de isolamento 7 entre as fases para

melhorar as propriedades de suporte dielétrico do meio dielétrico.

Preferivelmente, a bobina de CC 2 também é um superconductor e, mais especificamente, é um superconductor de alta temperatura abrigado em um criostato e refrigerado por um criorefrigerante (não mostrado).

A Figura 8 mostra a interconexão elétrica de duas bobinas de CA da estrutura da Figura 7, mostrando o sentido e a direção dos enrolamentos de uma em relação à outra.

A título de exemplo, o FCL saturado de núcleo aberto do tipo mostrado na Figura 7 foi analisado empregando FEA. As correntes de CC e de CA foram escalonadas a fim de encontrar os valores ideais de I_{dc} e I_{ac} para um determinado número de voltas sobre cada um desses enrolamentos e para compreender a natureza da magnetização de um núcleo aberto. Os parâmetros empregados foram os de um FCL de subestação de classe de 15 kV típica e incluem:

- Número de núcleos: 6
- Comprimento de um pino do núcleo: 0,6 m
- Acore, a área em seção transversal de cada núcleo: 0,0225 m², com uma dimensão de 150 mm x 150 mm
- N_{ac} : 50
- N_{dc} : 500
- I_{dc} : Escalonado de zero até 500 amperes. (até 250.000 amperes-voltas CC na bobina de DC)
- I_{ac} : Escalonado de zero até 1.000 amperes rms. (até 50.000 amperes-voltas CA na bobina de AC)

Os parâmetros do material empregados são aqueles das laminações de transformador M6, e têm 0,35 mm de espessura.

A Figura 9 mostra a distribuição do campo magnético e da permeabilidade relativa através do comprimento na direção Z da estrutura mostrada na Figura 7. É indicada a

região do núcleo apropriada para colocar uma bobina de AC, a região saturada do núcleo de alta permeabilidade. Este resultado mostra, por exemplo, que a bobina de CA deve ser projetada de maneira tal que sua altura seja de 400 mm e que
5 fique localizada no núcleo a não menos de 100 mm de cada extremidade do núcleo.

A Figura 10 mostra um gráfico do campo magnético ao longo de uma linha que passa através do centro de três núcleos e na direção X. Este resultado mostra que o campo
10 magnético em todos os núcleos é suficiente para saturar todos os seis núcleos em uma disposição X-Y dos pinos do núcleo, apesar da distância não uniforme e da relação geométrica com o enrolamento da bobina de CC.

A Figura 11 mostra a magnetização de CC ($I_{ac} = 0$)
15 do núcleo na região central do núcleo indicada na Figura 9.

A Figura 12 mostra a curva de excursão de magnetização de CA menor da parte central do núcleo em dois valores de corrente de polarização de CC diferentes.

A partir de uma consideração apenas à Figura 11, é
20 possível concluir que a energização de uma bobina de CC de 80.000 amperes-voltas CC (equivalente a uma corrente CC de 160 amperes na bobina de CC de 500 voltas) seria suficiente para saturar o núcleo. No entanto, uma consideração das curvas de magnetização menores da bobina de CA (Figura 12) e
25 da permeabilidade relativa do núcleo sob energização da bobina de CA (Figura 13) mostra que pelo menos 140.000 amperes-voltas da bobina de CC (isto é, pelo menos 280 amperes CC na bobina de DC) são necessários para que o núcleo tenha uma permeabilidade relativa baixa e desse modo acarrete
30 uma impedância de baixa inserção na bobina de CA.

A Figura 12 mostra que uma corrente de CA de até 1.000 amperes na bobina de CA deve dessaturar o núcleo com uma corrente de operação de CC tão baixa quanto 160 A (80.000

amperes-voltas). Isto é indesejável e tal projeto deve produzir uma impedância de alta inserção, THD elevado e uma forma de onda de corrente distorcida. A título de comparação, também é mostrado o cálculo do circuito de magnetização de CC menor em um ponto de operação de 500 A, o qual é um ponto de operação mais desejável. Sob essas condições, o núcleo é supersaturado sob a bobina de CA e é um ponto de operação mais apropriado.

Em geral, ao considerar a lista completa de variáveis de otimização, os cálculos combinados da magnetização de CC e da magnetização menor de CC não constituem uma abordagem avançada direta para encontrar amperes-voltas de operação de CC apropriados e requer um longo processo de otimização de FEA. Para simplificar o processo, o autor da presente invenção propõe uma análise de magnetização estática do núcleo com a bobina de CA energizada até o pico da forma de onda da corrente sob carga máxima. A Figura 14 mostra tal cálculo de FEA com o qual fica claro que neste caso uma magnetização de CC de 150.000 amperes-voltas é necessária para que o núcleo permaneça em saturação a cada ponto instantâneo da forma de onda da corrente de CA.

É realmente importante que um limitador de corrente de fuga tenha uma impedância de baixa inserção. Na presente realização, isto é conseguido, garantindo que o volume do núcleo de aço sob influência magnética direta da bobina de CA seja inteiramente saturado pela bobina de CC até um nível, B_{sat} , de maneira tal que permaneça saturado na condição de operação de estado estável normal de AC.

O projeto de FCL de núcleo saturável mostrado na Figura 7 satisfaz os quatro critérios principais para um FCL e tem as vantagens de:

- Massa mais baixa através da ausência de jugos e de membros exteriores.

- Área mais baixa para uma determinada corrente de fuga e classificação de estado estável.

- Baixo custo de construção.

Ao inverter as posições relativas da bobina de CA e de DC, os seguintes benefícios técnicos também são obtidos:

- A estrutura fica diretamente incrementada para os projetos de alta tensão e de tensão extra-alta sem precisar de alimentações de passagem dielétricas especiais ou interface vácuo-dielétrico. A parte central do núcleo de alta permeabilidade pode ser imersa em um líquido ou fluido dielétrico gasoso do mesmo modo que um transformador de energia é completamente imerso em um fluido dielétrico.

- Os aspectos da tecnologia e do corpo de conhecimento sobre o projeto de transformador de alta tensão com óleo de silício sintético ou outros dielétricos são aplicáveis a este projeto básico, que inclui dielétricos de alta tensão gasosos, tais como o SF6. Isto reduz o risco substancial envolvido no processo do projeto e do desenvolvimento para versões de alta tensão desses dispositivos.

- Os materiais sólidos padrão bem conhecidos utilizados para imersão em líquidos dielétricos e empregados em tensão estática alta podem ser empregados.

- As bobinas de fase de CA envolvem uma área dos membros de aço que é supersaturada.

- A extensão da influência eletromagnética das bobinas de CA é tal que a impedância de inserção é muito próxima do mínimo teórico que pode ser. Por exemplo, tal como ilustrado na Figura 9 e na Figura 13. Nessas figuras a FEA revelou que a permeabilidade relativa dos núcleos é muito próxima da unidade, apesar da distância não uniforme da bobina de CC da trilha do enrolamento.

Em uma outra realização, os núcleos abertos são

afunilados nas extremidades de uma maneira que mantém todo o núcleo saturado.

Na realização adicional mostrada na Figura 15, os pinos do núcleo de cada fase são conectados com um jugo, mas permanecem abertos em uma extremidade.

A Figura 19 mostra um FCL que tem um núcleo aberto monofásico com os seguintes detalhes:

- Dimensões do núcleo: 100 mm x 100 mm x 570 mm
- Número de voltas sobre cada núcleo da bobina de AC: 20
- Número de voltas sobre a bobina de polarização DC: 100

Os resultados do arranjo experimental mostrado na Figura 19 são fornecidos nas Figuras 20 a 26. Mais particularmente, a Figura 20 mostra uma impedância de inserção sem falha de estado estável medida em 50 Hz nos terminais de FCL de núcleo aberto. Há uma mudança distinta na característica da impedância de inserção quando uma polarização de CC suficiente é aplicada. Na parte A da Figura 20, abaixo da impedância de inserção mínima, a saturação magnética do núcleo de alta permeabilidade não alcançou ainda o volume completo do núcleo sob influência magnética da bobina de CA. Desse modo, a impedância de inserção medida é alta.

Na parte B da Figura 20, a saturação magnética do núcleo de alta permeabilidade alcançou a extensão da influência da bobina de CA. Isto mostra que uma região do núcleo de alta permeabilidade igual a pelo menos a altura da bobina de CA deve ser saturado pela bobina de CC a fim de obter a impedância de inserção mínima para o projeto de núcleo aberto.

A Figura 21 mostra as características da impedância de inserção de estado estável sem falha do FCL de núcleo

aberto para várias voltagens e níveis de corrente diferentes e mostra que esta quantidade é independente do nível de voltagem de CA e do nível de corrente.

Os gráficos de corrente de CA de transientes na Figura 22 indicam a diferença na corrente de fuga com e sem o FCL colocado no circuito de medição. Esses dados mostram que reduções significativas na corrente de fuga são possíveis para o arranjo de FCL de núcleo aberto.

A Figura 23 mostra a densidade de fluxo medida no núcleo de aço como uma função de tempo durante o evento de corrente de fuga. A corrente de fuga dessatura eficazmente a região do núcleo de aço sob as bobinas de CA. Isto resulta em um FCL que tem uma alta impedância durante a fuga e consequentemente em propriedades de limitação de corrente de fuga eficazes intrínsecas.

Os dados mostrados na Figura 24 indicam que se o núcleo de alta permeabilidade estiver suficientemente saturado, a voltagem de transiente induzida na bobina de CC permanece controlável e não é imprópriamente prejudicial durante a fuga. Isto é semelhante ao projeto do núcleo de FCL saturado clássico.

A Figura 25 mostra as formas de onda da corrente de fuga transiente medidas com a corrente de fuga esperada calculada depois de permitir a resistência da bobina de CA e o componente indutivo sem falha de estado estável da impedância da bobina de CA do FCL. A redução adicional na corrente de fuga de um pico de 2.000 amperes para um pico de 1.100 amperes é devida à mudança adicional na magnetização depois de permitir a resistência da bobina de CA e a impedância de inserção sem falha do estado estável.

A Figura 26 mostra os transientes de corrente de CC medidos durante o evento de falha em vários valores de corrente de polarização de CC diferentes. A corrente de CC de

transiente induzida será insignificante se o núcleo de aço estiver suficientemente polarizado.

A Figura 27 mostra um arranjo experimental alternativo do FCL de núcleo aberto que inclui jugos entre os núcleos e é projetado para diminuir os amperes-voltas de polarização de CC necessários para a impedância da inserção baixa. Os detalhes do projeto são os seguintes:

- Dimensões do núcleo de alta permeabilidade: 100 mm x 100 mm x 570 mm (altura)

- Dimensões do jugo: 100 mm x 100 mm x 250 mm (altura)

- Número de voltas em cada núcleo da bobina de AC: 20

- Número de voltas na bobina de polarização de DC: 100

Uma comparação entre os resultados da impedância de inserção obtidos para as configurações bifurcadas e não bifurcadas é fornecida na Figura 28, onde são mostradas as características da impedância de inserção de estado estável sem falha de 50 Hz medidas de um FCL de núcleo aberto com e sem os jugos.

A Figura 29 mostra que a bifurcação do arranjo do núcleo dentro da bobina de polarização de CC desloca a curva de magnetização para a esquerda, permitindo que menos amperes-voltas sejam utilizados para obter a impedância de inserção mínima.

A Figura 30 mostra a faixa completa de impedância da inserção para a configuração bifurcada, que mostra uma melhoria significativa na impedância de fuga deste arranjo em amperes-voltas aplicados de CC mais baixos.

Os gráficos de corrente de fuga para o arranjo experimental de FCL de núcleo aberto bifurcado na Figura 31 mostram a diferença que a presença dos FCL bifurcados faz

para os vários modos de polarização de CC em comparação com um sistema sem o FCL.

5 A densidade de fluxo magnético no material de núcleo altamente permeável medida no topo da bobina de CA também foi medida na Figura 32, indicando o mesmo comportamento característico que aquele no arranjo experimental de núcleo aberto bifurcado.

10 A Figura 33 mostra as formas de onda de uma corrente de transiente de circuito de CC através de uma faixa de níveis de polarização diferentes. Assim como para o arranjo de FCL de núcleo aberto não bifurcado, a corrente de CC de transiente induzida é insignificante para núcleos suficientemente polarizados.

15 O benefício principal de arranjar as bobinas de CC e de CA tal como ilustrado nas realizações é que a bobina de CA experimenta a densidade de fluxo de CC completa do núcleo de aço sob a bobina de CC. Os projetos clássicos de FCL saturado apresentam a desvantagem de transportar o fluxo dos membros de CC para os membros de CA através dos jugos
20 superiores e inferiores e em torno das junções inseridas dentro do núcleo. As presentes realizações dispensam o jugo e os membros do lado de CA tornando o transporte de fluxo das bobinas de CC e de CA quase 100% eficiente.

25 Deve ser apreciado que nas realizações ilustradas cada limitador de corrente de fuga inclui pelo menos um terminal de entrada na forma de uma bucha de alta voltagem para se conectar eletricamente a uma fonte de energia, tal como um transformador, que fornece uma corrente de carga. Cada uma das realizações também inclui pelo menos um terminal
30 de saída, também na forma de uma ou mais buchas de alta voltagem, para conexão elétrica com um circuito de carga, tal como um sistema de distribuição elétrico, que extrai a corrente de carga. Também são incluídos um núcleo saturável

magneticamente e pelo menos uma bobina de CA - tipicamente uma bobina para cada fase da corrente de carga - que é enrolada em uma parte longitudinal do núcleo para conduzir a corrente de carga entre o terminal ou terminais de entrada e o terminal ou terminais de saída. Uma bobina de CC induz um campo magnético pelo menos na parte do núcleo e se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de CA. Nas realizações ilustradas, as zonas intermediárias são definidas pelos respectivos tanques. O campo induzido pela bobina de CC polariza magneticamente o núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

Deve ser apreciado que em muitas aplicações, particularmente onde um FCL deve ser reajustado a uma instalação existente, o espaço físico disponível para acomodar o FLC é frequentemente limitado. Ainda mais usualmente, a restrição física mais significativa é a área disponível para o FCL. Examinemos agora as Figuras 35 e 36, onde é ilustrado um FCL de núcleo aberto monofásico que foi desenvolvido para aplicações de áreas pequenas. O FCL inclui um terminal de entrada na forma de uma bucha de alta voltagem para a conexão elétrica com uma fonte de energia (não mostrada) que fornece uma corrente de carga. Um terminal de saída, na forma de uma bucha de alta voltagem adicional, conecta eletricamente com um circuito de carga (não mostrado) que extrai a corrente de carga. Um núcleo saturável magneticamente tem a forma de dois pinos de aço laminados de alta permeabilidade que se estendem longitudinalmente e que são empilhados um sobre o outro de extremidade a extremidade. Uma bobina de CA tem dois segmentos de bobina que são enrolados de modo oposto nas respectivas partes longitudinais dos pinos para conduzir a corrente de carga entre o terminal

de entrada e o terminal de saída. Uma bobina de DC, na forma de duas sub-bobinas separadas entre si, induz um campo magnético em pelo menos parte dos pinos e se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de CA. Nesta realização, a zona é definida pelo tanque. O campo polariza magneticamente os pinos de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

Uma realização de uma área pequena adicional é ilustrada nas Figuras 37 e 38. Nesta realização, é utilizado um núcleo de energia comprimido. Isto fornece um fator de preenchimento maior do material de alta permeabilidade dentro da área de seção transversal da bobina de CA do que aquele que pode ser conseguido com laminações. Por conseguinte, para a mesma área, e supondo que todo o resto seja igual, o FCL desta realização confere um desempenho melhorado do que aquele das Figuras 35 e 36.

Em uma realização adicional, o FCL das Figuras 37 e 38 é desenvolvido para apresentar o mesmo desempenho que o FCL das Figuras 35 e 36. Devido ao fator de preenchimento maior, esta realização adicional tem uma área menor do que o FCL das Figuras 37 e 38.

Uma outra realização do FCL é ilustrada nas Figuras 39 e 40. Esta realização é um FCL de núcleo aberto trifásico que tem três pares de pinos de extensão igual paralelos e longitudinais - um par de pinos para cada fase - para definir coletivamente o núcleo. Os pinos têm uma seção transversal transversa constante e uniforme que é assimétrica. Os pares de pinos incluem jugos, e os pinos, as bobinas de CA associadas e todos os jugos são dispostos dentro de um tanque que contém um meio dielétrico que também age como um meio de refrigeração.

As Figuras 41 e 42 ilustram uma realização adicional que é similar àquela das Figuras 39 e 40, em que a principal diferença é a omissão de jugos para reduzir ainda mais a quantidade de volume ocupado pelo FCL.

5 Deve ser apreciado que os limitadores de corrente de fuga ilustrados nas Figuras 39 a 42 incluem pinos que têm pinos assimétricos que são arranjados em relação uns aos outros para definir geralmente um cilindro. Esta forma e arranjo relativo ou orientação relativa dos pinos também
10 contribuem para uma área pequena para o FCL.

Em outras realizações, abordagens diferentes são utilizadas para otimizar a área para o FCL, ou então satisfazer todas as especificações de acomodação para um determinado local. Por exemplo, é feita referência à Figura
15 43, a qual ilustra um FCL que inclui um núcleo que tem pinos em seção transversal retangulares arranjados em uma disposição 3 x 2 empilhada. Os dois segmentos de bobina para a bobina de CA de mesma fase são arranjados um sob o outro. Esta configuração de FCL de núcleo aberto é utilizada, por
20 exemplo, onde a área de um local é limitada, e uma altura maior é permitida.

Uma realização adicional é ilustrada na Figura 44, onde um FCL inclui um núcleo que tem pinos em seção transversal retangulares arranjados em uma disposição 3 x 2
25 lado a lado. Esta configuração do FCL de núcleo aberto é utilizada, por exemplo, onde os requisitos de altura são limitados, mas uma área maior é permitida.

Um exemplo adicional de um FCL é ilustrado na Figura 45, que inclui um núcleo que tem pinos em seção
30 transversal retangulares arranjados em uma disposição 3 x 2 empilhada que são bifurcados.

Em comparação com o limitador de corrente de fuga de núcleo saturável de "núcleo fechado" do estilo de

estrutura de desenho conhecido, as realizações acima descritas têm as seguintes vantagens:

- Redução significativa na massa de aço necessária e desse modo custo reduzido de fabricação, transporte e localização do local.

- Para um desempenho similar, uma redução na área. Isto é particularmente vantajoso ao facilitar as questões de colocação nas localizações urbanas densas.

- Nos casos em que um superconductor é empregado para a bobina ou as bobinas de polarização de DC, uma área de superfície de criostato menor. Isto resulta em menos perda de calor no ambiente de estado estável, e desse modo em um menor requisito de energia do criorefrigerante.

- Desacoplamento mecânico da bobina de polarização de CC e do criostato das bobinas de fase de CA e do núcleo de aço. Isto permite que o tanque de óleo seja baixado para a área interna quente da bobina de DC, ou as bobinas de CC podem ser baixadas sobre os tanques de óleo que contêm as bobinas de fase e os núcleos.

Em comparação aos arranjos de limitador de corrente de fuga alternativos, tais como os tipos resistivo, os tipos resistivos com reator externo ou interno, de núcleo protegido, de estado sólido, o limitador de corrente de fuga de núcleo aberto, saturável, têm estas vantagens:

- O limitador de corrente de fuga de núcleo aberto não causará danos a uma linha protegida e não precisará ser isolado de uma linha protegida se qualquer aspecto da parte supercondutora falhar, seja ela a bobina de DC, o sistema de vácuo ou o sistema criogênico. Desse modo, os limitadores de corrente de fuga de núcleo aberto das realizações são inerentemente seguros contra falhas e podem ser deixados na linha protegida sob essas condições. Além disso, a redundância associada com os alarmes e a detecção de

falhas internas pode ser muito menos restritiva se comparada com os projetos que devem ser colocados fora de atividade por uma falha interna.

5 - Nenhuma das bobinas de polarização de CC (seja uma bobina supercondutora ou não) é conectada diretamente à linha de alta voltagem ou de corrente elevada da grade ou fonte de eletricidade que está sendo protegida. Desse modo, procedimentos de projeto dielétrico simples, estabelecidos e bem conhecidos podem ser utilizados para projetar a parte de
10 alta voltagem.

- Substâncias criogênicas líquidas não são utilizadas como um dielétrico de CA e, desse modo, as questões associadas com esses líquidos não existem no projeto das realizações preferidas.

15 - Os elementos supercondutores não são sujeitos a tensão da corrente de fuga. Por conseguinte, há uma indução muito pequena da corrente e da voltagem na bobina de CC durante uma falha.

- O superconductor não se resfria bruscamente
20 durante uma fuga e desse modo não pode ser utilizado em linha onde os autoreligadores ou a religação lógicos são empregados nos disjuntores e nos isoladores de uma linha protegida.

A referência por todo este relatório descritivo a "uma realização" ou a "realização" significa que um aspecto, estrutura ou característica em particular descritos em
25 relação à realização estão incluídos em pelo menos uma realização da presente invenção. Desse modo, o aparecimento das frases "em uma realização" ou "na realização" em vários lugares por todo este relatório descritivo não estão
30 necessariamente se referindo à mesma realização, mas isso pode ocorrer. Além disso, os aspectos, as estruturas ou as características em particular podem ser combinados de qualquer maneira apropriada, tal como fica evidente a técnico

no assunto desta descrição, em uma ou mais realizações.

Do mesmo modo, deve ser apreciado que na descrição acima das realizações exemplificadoras da invenção, várias características da invenção são algumas vezes agrupadas em uma única realização, figura ou descrição da mesma para a finalidade de organizar a descrição e de ajudar na compreensão de um ou mais dos vários aspectos da invenção. Este método de descrição, no entanto, não deve ser interpretado como refletindo uma intenção de que a invenção reivindicada precise de mais características do que é expressamente relatado em cada reivindicação. Em vez disso, tal como as reivindicações a seguir refletem, os aspectos da invenção encontram-se em menos do que todas as características de uma única realização descrita anteriormente. Desse modo, as reivindicações a seguir são aqui incorporadas expressamente na descrição da invenção, em que cada reivindicação é ela própria uma realização separada da presente invenção.

Realizações adicionais da invenção são apresentadas no Pedido de Patente Australiano n° 2009901138, depositado em 16 de março de 2009, e cuja prioridade é reivindicada. Os detalhes dessas realizações são aqui incorporados expressamente a título de referência remissiva.

Além disso, embora algumas realizações aqui descritas incluam algumas mas não outras das características incluídas em outras realizações, combinações de características de realizações diferentes - incluindo as realizações apresentadas nos relatórios descritivos de patente cujo benefício de prioridade é reivindicado - devem estar dentro do âmbito da invenção, e formem diferentes realizações, tal como deve ser compreendido pelos elementos versados na técnica. Por exemplo, nas reivindicações a seguir, algumas das realizações reivindicadas podem ser

utilizadas em qualquer combinação.

Na descrição aqui apresentada, vários detalhes específicos são apresentados. No entanto, deve ser compreendido que as realizações da invenção podem ser praticadas sem esses detalhes específicos. Em outros exemplos, os métodos, as estruturas e as técnicas bem conhecidas não foram mostradas em detalhes a fim de não dificultar a compreensão desta descrição.

Os técnicos no assunto irão reconhecer que esses são exemplos aplicados a projetos específicos que foram fabricados e que os resultados detalhados de outros projetos com detalhes de construção diferentes irão diferir. As conclusões principais e o padrão dos resultados devem ser considerados.

Embora a invenção tenha sido descrita com referência a exemplos específicos, deverá ser apreciado pelos técnicos no assunto que eles podem ser incorporados de muitas outras formas.

REIVINDICAÇÕES

1. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA PARA INCORPORAÇÃO EM UM CIRCUITO ELÉTRICO, caracterizado pelo fato de incluir um núcleo saturável magneticamente e pelo menos uma bobina de fase de CA enrolada em torno de uma parte do dito núcleo saturável, sendo que o dito núcleo saturável magneticamente e pelo menos uma dita bobina de fase de CA são abrigados dentro de um invólucro e uma bobina de polarização de CC é disposta fora do dito invólucro e circundando o mesmo, a qual, durante condições de operação sem falha do dito limitador de corrente, polariza o dito núcleo em saturação magnética em uma impedância de baixa inserção, mas durante condições de falha tira o dito núcleo da saturação magnética para, desse modo, conferir uma impedância limitadora de corrente aumentada no dito circuito elétrico.

2. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de incluir somente uma bobina de polarização de CC.

3. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de incluir duas ou mais bobinas de polarização de CC.

4. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que as bobinas de polarização de CC são espaçadas entre si.

5. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma ou mais das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que a dita bobina de polarização de CC é um supercondutor de alta temperatura.

6. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que a dita bobina de polarização de CC coincide com uma bobina coaxial com pelo menos uma dita bobina de fase de CA de modo que a dita parte do núcleo saturável seja inteiramente saturada.

7. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que o dito núcleo saturável magneticamente está na forma de uma disposição de pinos do núcleo com cada uma das bobinas de fase de CA enroladas nos respectivos ditos pinos do núcleo e interconectadas eletricamente de uma maneira tal que os sentidos dos campos magnéticos produzidos pelas ditas bobinas de CA são opostos.

8. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que os ditos pinos do núcleo têm uma seção transversal retangular.

9. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 7 ou a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que os pinos do núcleo são conectados por um jugo em uma extremidade e são abertos na outra extremidade.

10. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 7 a 9, caracterizado pelo fato de que os ditos pinos do núcleo são de seção transversal constante ao longo dos comprimentos dos mesmos.

11. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 7 a 10, caracterizado pelo fato de que os ditos pinos do núcleo são afunilados na direção das extremidades dos mesmos, com o que, durante uma operação sem falha do limitador, substancialmente todo o dito núcleo é saturado.

12. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11, caracterizado pelo fato de que o dito limitador tem uma configuração de núcleo aberto.

13. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que uma região do dito núcleo igual a pelo menos a altura da bobina de CA é substancialmente saturado de modo integral pela bobina de CC

a fim de obter uma impedância de inserção mínima durante condições de operação sem falha.

14. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 13, caracterizado pelo fato de que o dito núcleo saturável magneticamente é construído de um material de laminação de aço de transformador, de aço doce ou de outro aço magnético, de material de ferrita, de um pó comprimido de alta permeabilidade ou de um material ferromagnético.

15. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 14, caracterizado pelo fato de que o dito núcleo saturável magneticamente e as ditas bobinas de fase de CA são imersos em um dielétrico.

16. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que o dito dielétrico está na forma de um líquido ou de um gás.

17. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 1 ou a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que a dita bobina de polarização de CC está na forma de uma bobina de CC de trilha de enrolamento.

18. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 17, caracterizado pelo fato de que o dito invólucro inclui dispositivos de refrigeração além do dito dielétrico.

19. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA PARA INCORPORAÇÃO EM UM CIRCUITO ELÉTRICO, caracterizado pelo fato de incluir:

um terminal de entrada para se conectar eletricamente a uma fonte de energia que fornece uma corrente de carga;

um terminal de saída para se conectar eletricamente a um circuito de carga que extrai a corrente de carga;

um núcleo saturável magneticamente;

uma bobina de CA enrolada em uma parte longitudinal do núcleo para conduzir a corrente de carga entre o terminal de entrada e o terminal de saída;

um invólucro para abrigar o núcleo saturável
5 magneticamente e a bobina de AC; e

uma bobina de CC para induzir um campo magnético em pelo menos uma parte do núcleo e que se estende sobre uma zona intermediária longitudinal que recebe o núcleo e a bobina de AC, sendo que o campo polariza magneticamente o
10 núcleo de maneira tal que a bobina de CA se move de um estado de baixa impedância para um estado de alta impedância em resposta a uma ou mais características da corrente de carga.

20. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 19, caracterizado pelo fato de incluir duas ou
15 mais bobinas de DC

21. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 20, caracterizado pelo fato de que as bobinas de CC são espaçadas entre si.

22. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a
20 reivindicação 19, caracterizado pelo fato de que, no estado de baixa impedância, a parte é magneticamente saturada.

23. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que, no estado de baixa impedância, o núcleo é magneticamente saturado
25 longitudinalmente além da parte.

24. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 19 a 23, caracterizado pelo fato de que, no estado de alta impedância, a parte fica fora da saturação magnética.

30 25. LIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 19 a 24, caracterizado pelo fato de que, no estado de baixa impedância, a impedância da bobina de CA é substancialmente igual à impedância de núcleo

de ar teórica da bobina de AC.

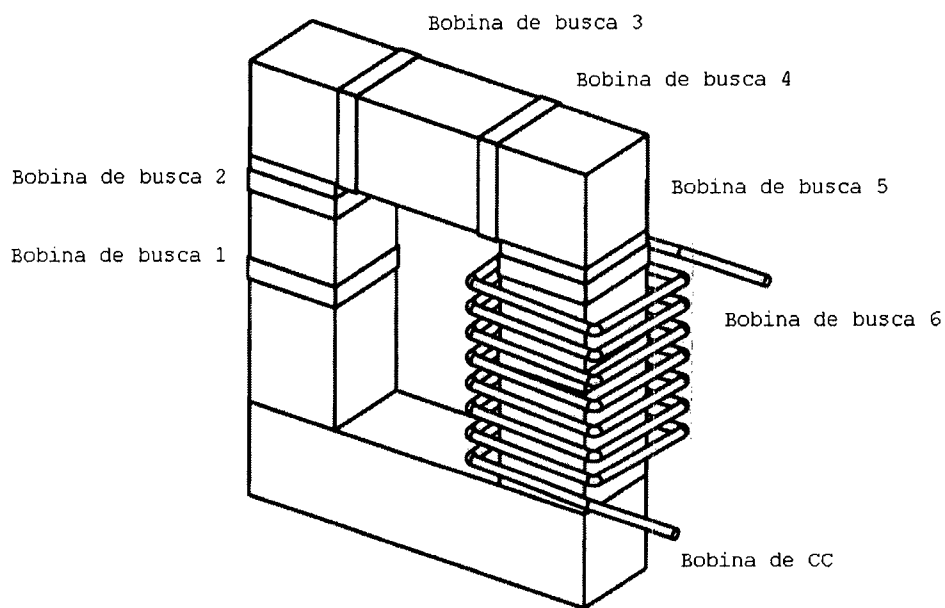


Fig. 1

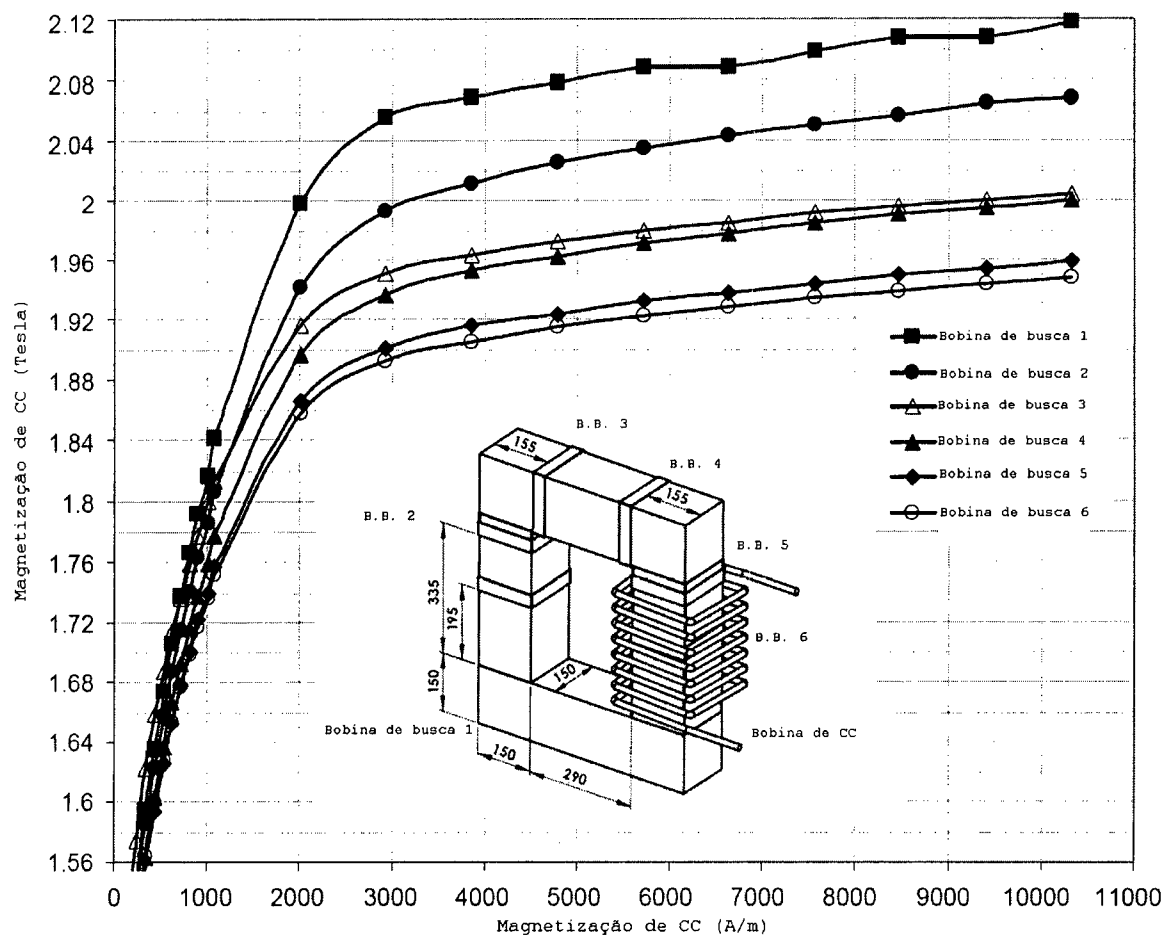


Fig. 2

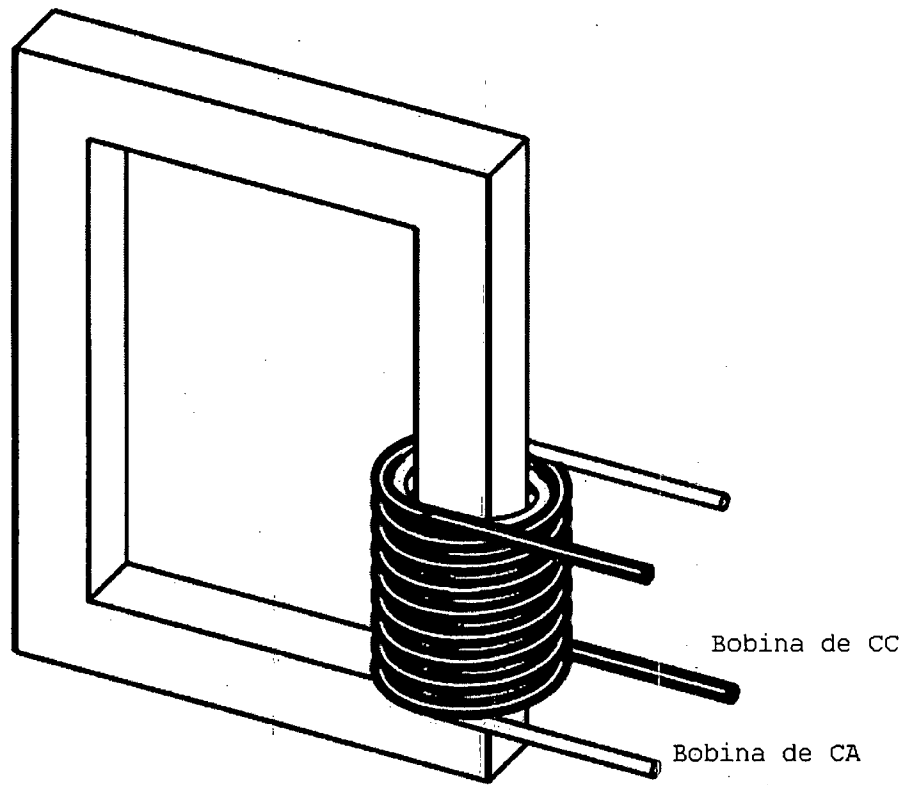


Fig. 3

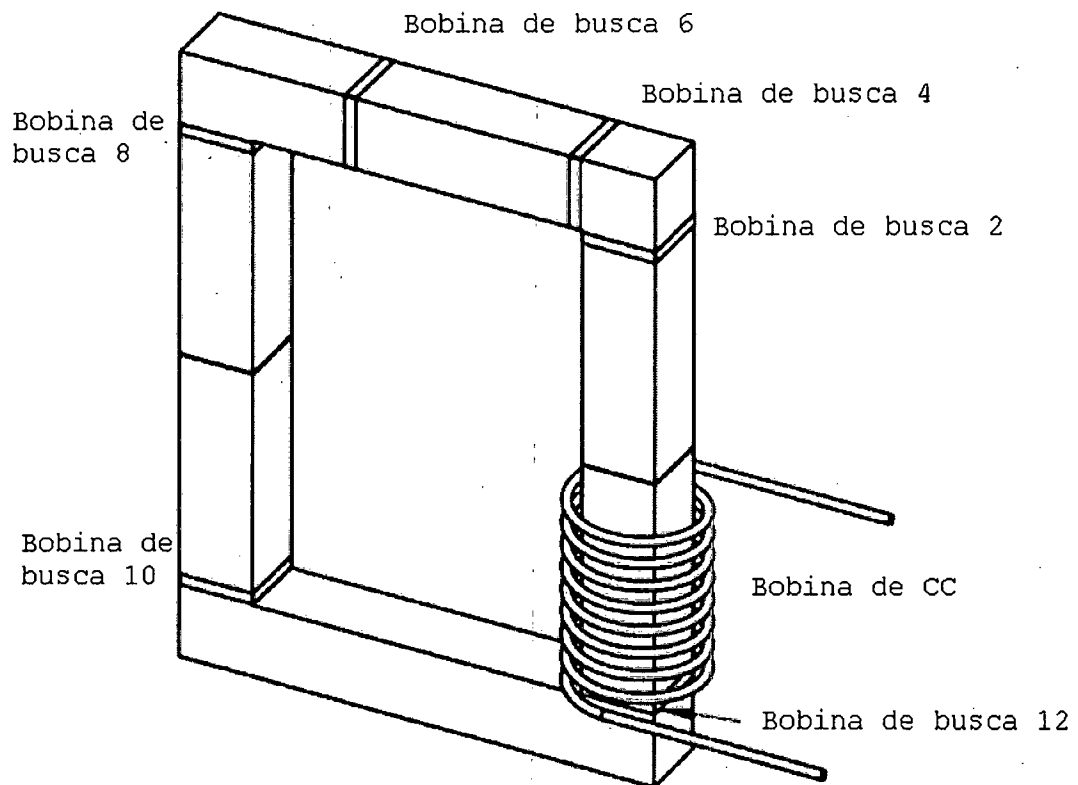


Fig. 4

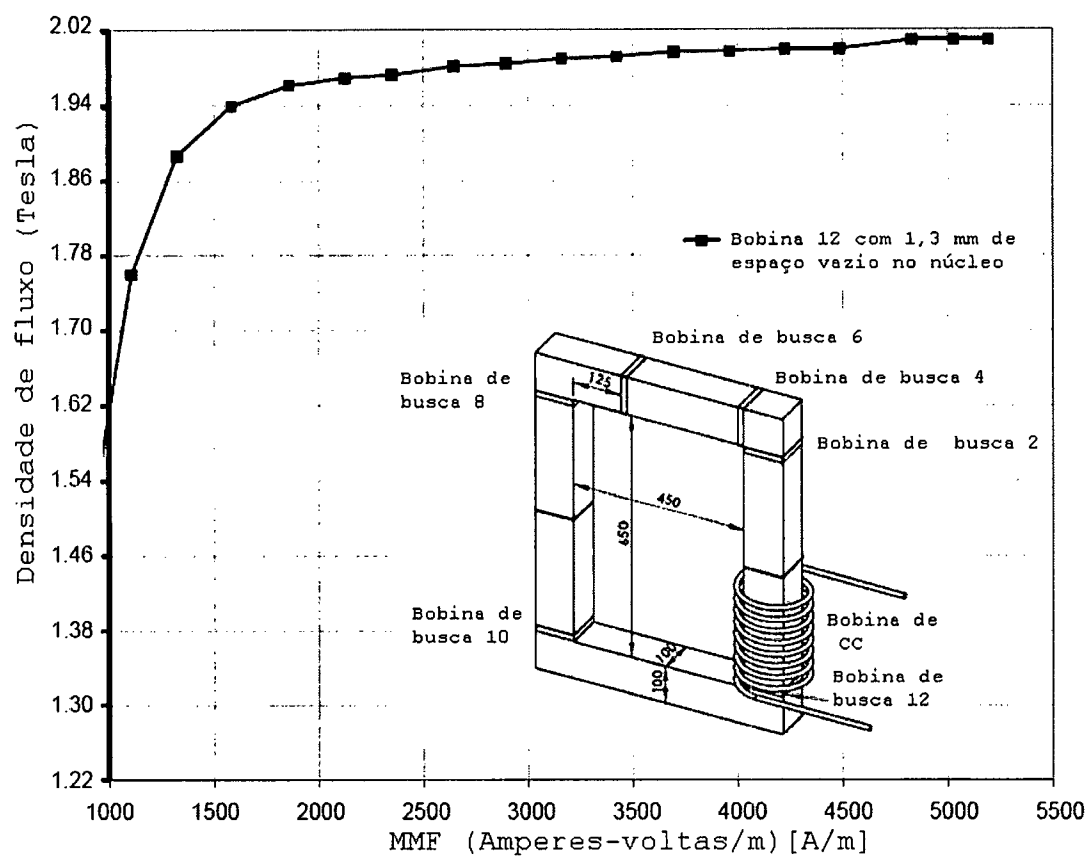


Fig. 5

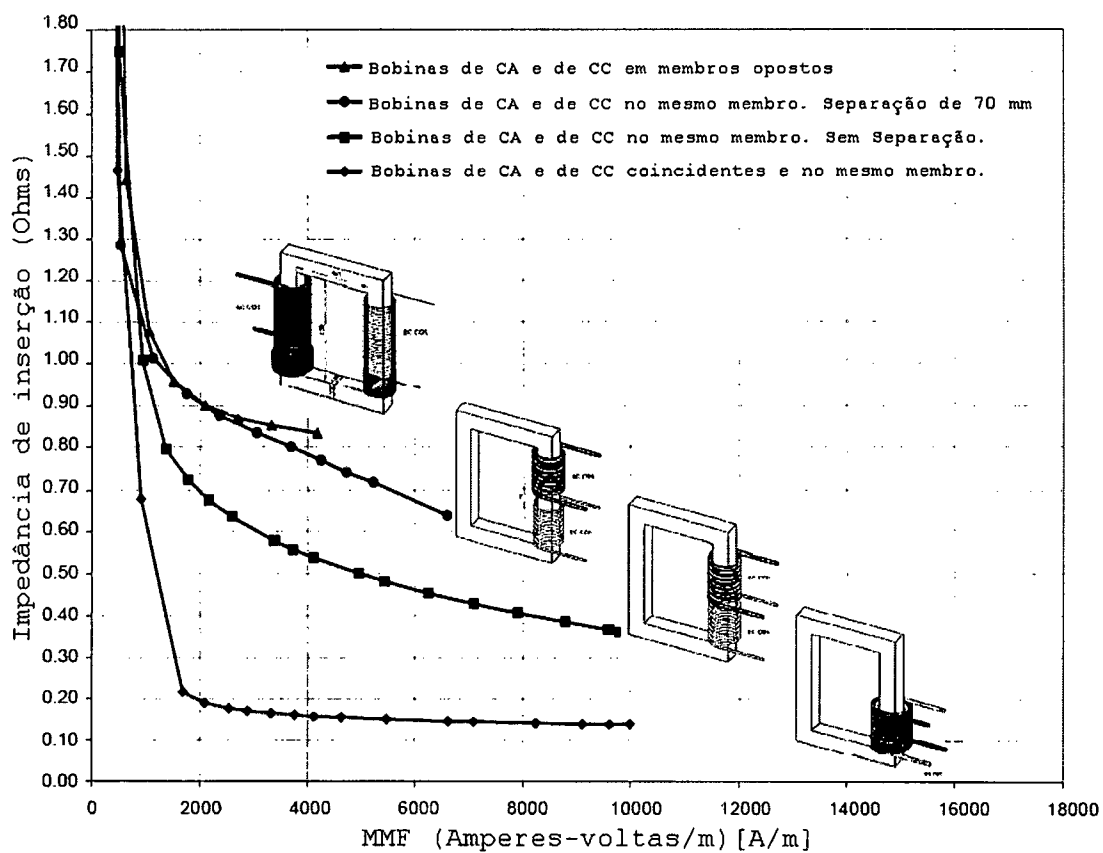


Fig. 6

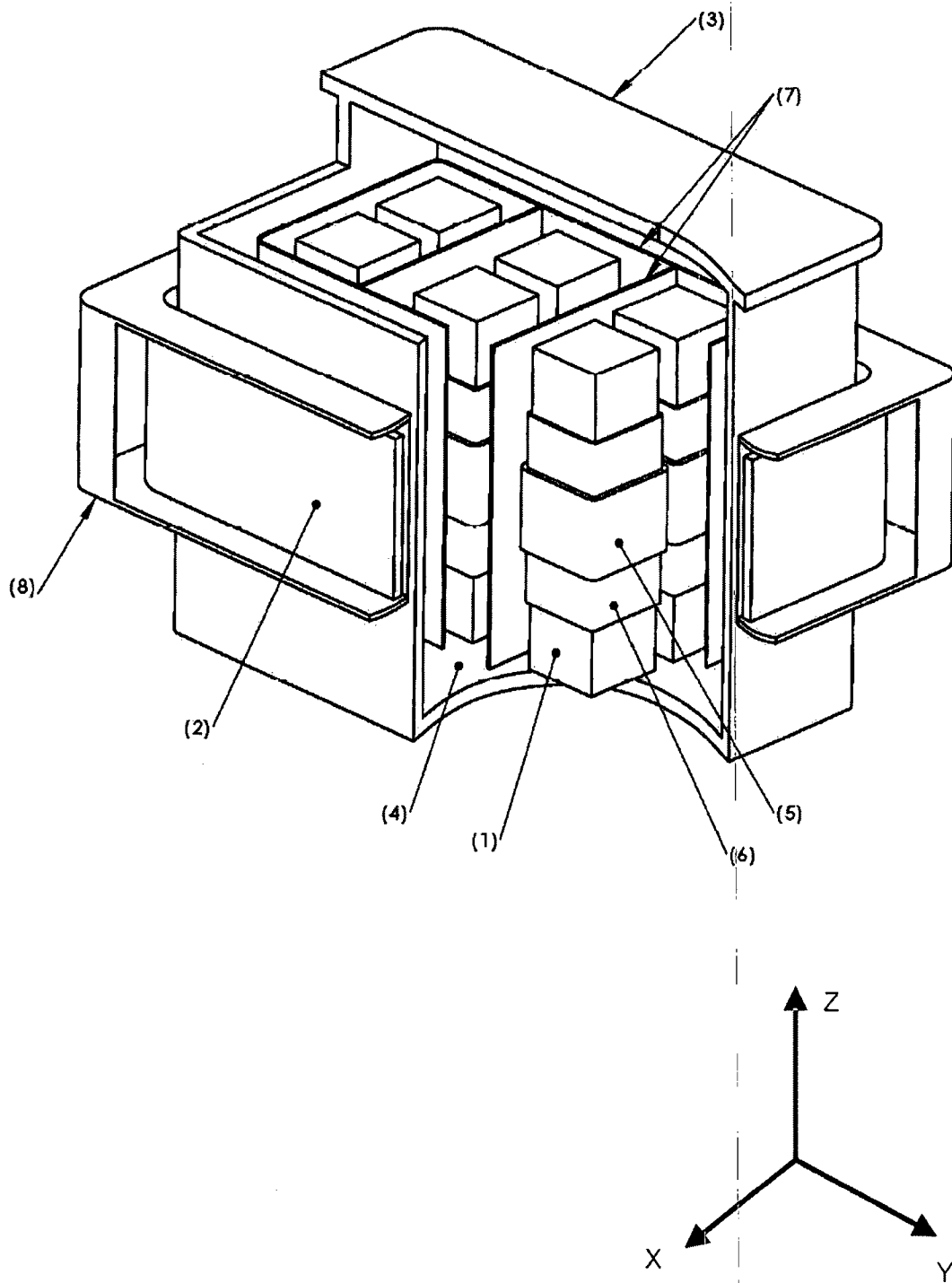


Fig. 7

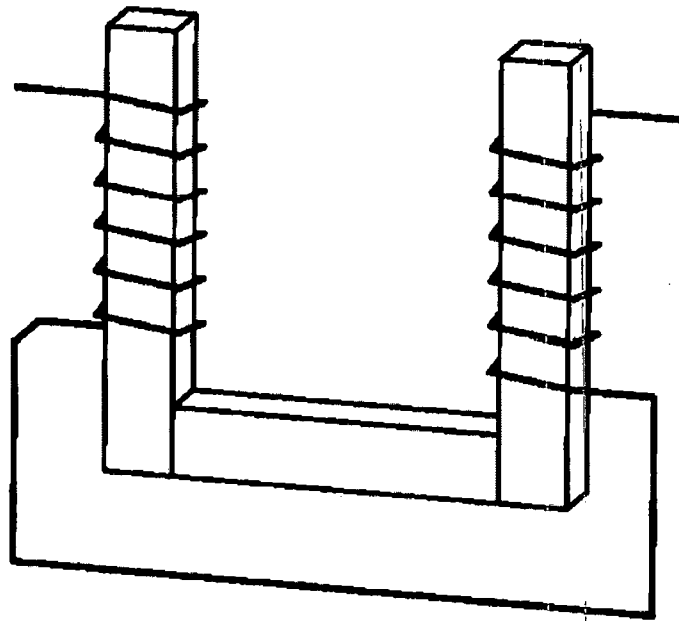


Fig. 8

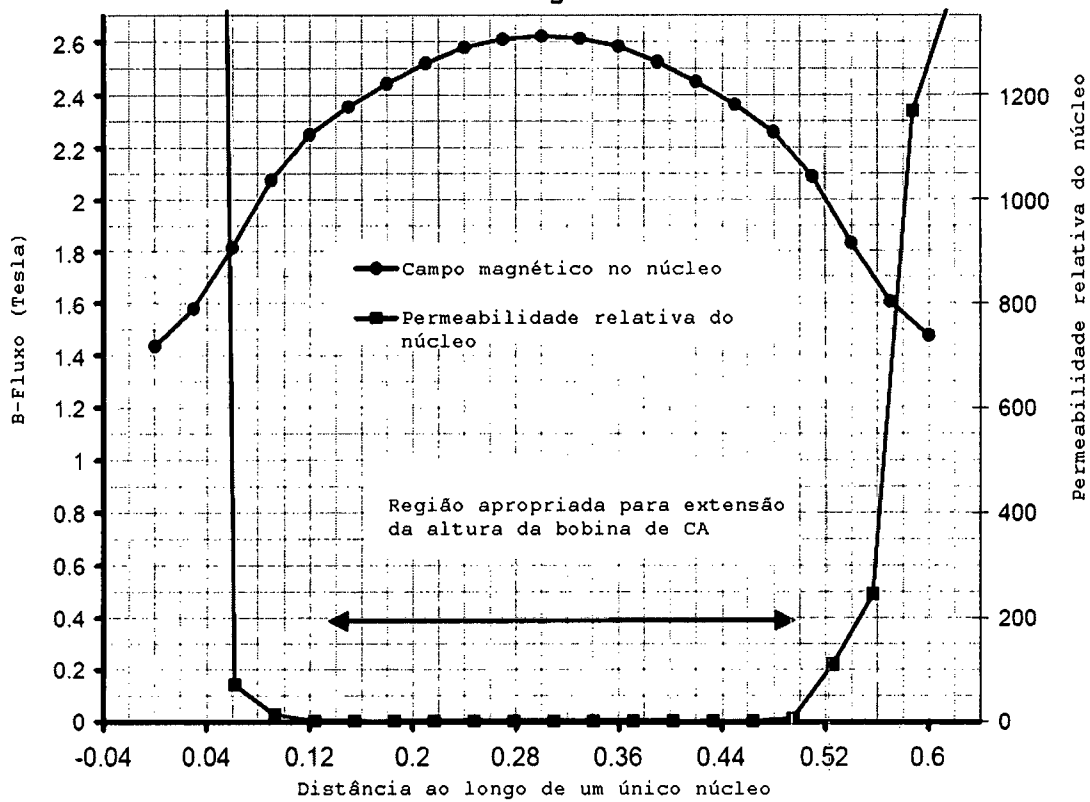


Fig. 9

6/29

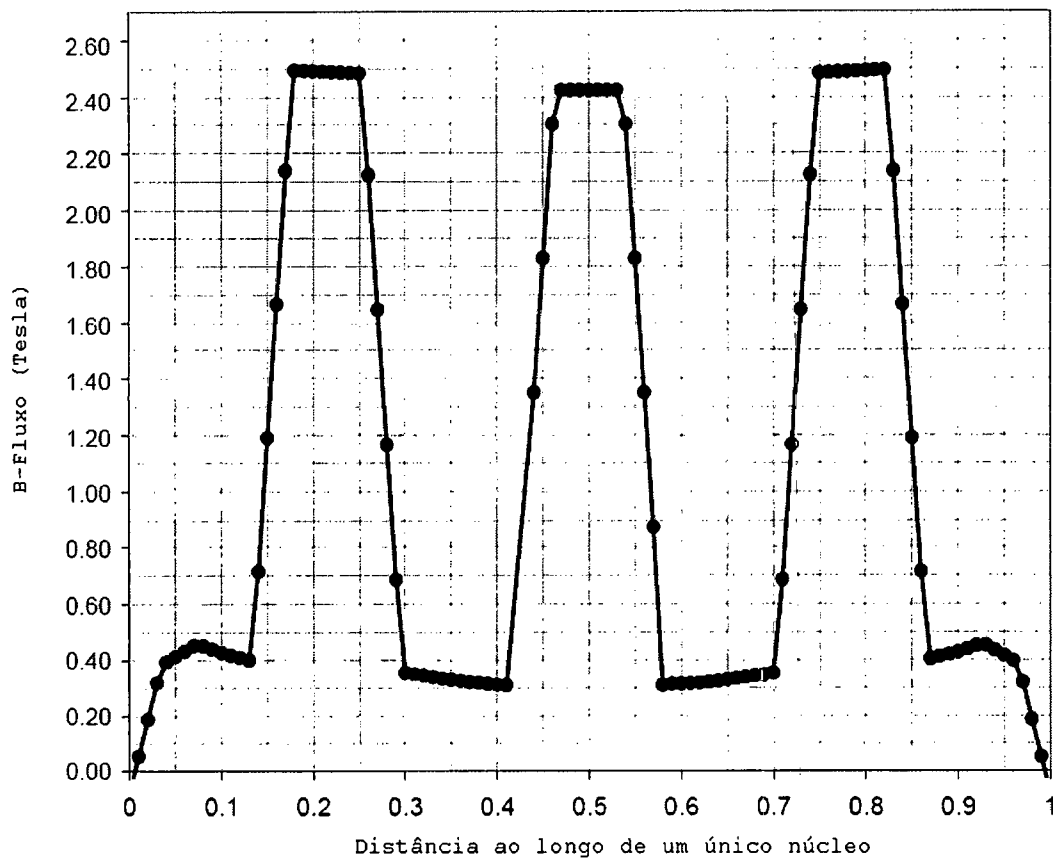


Fig. 10

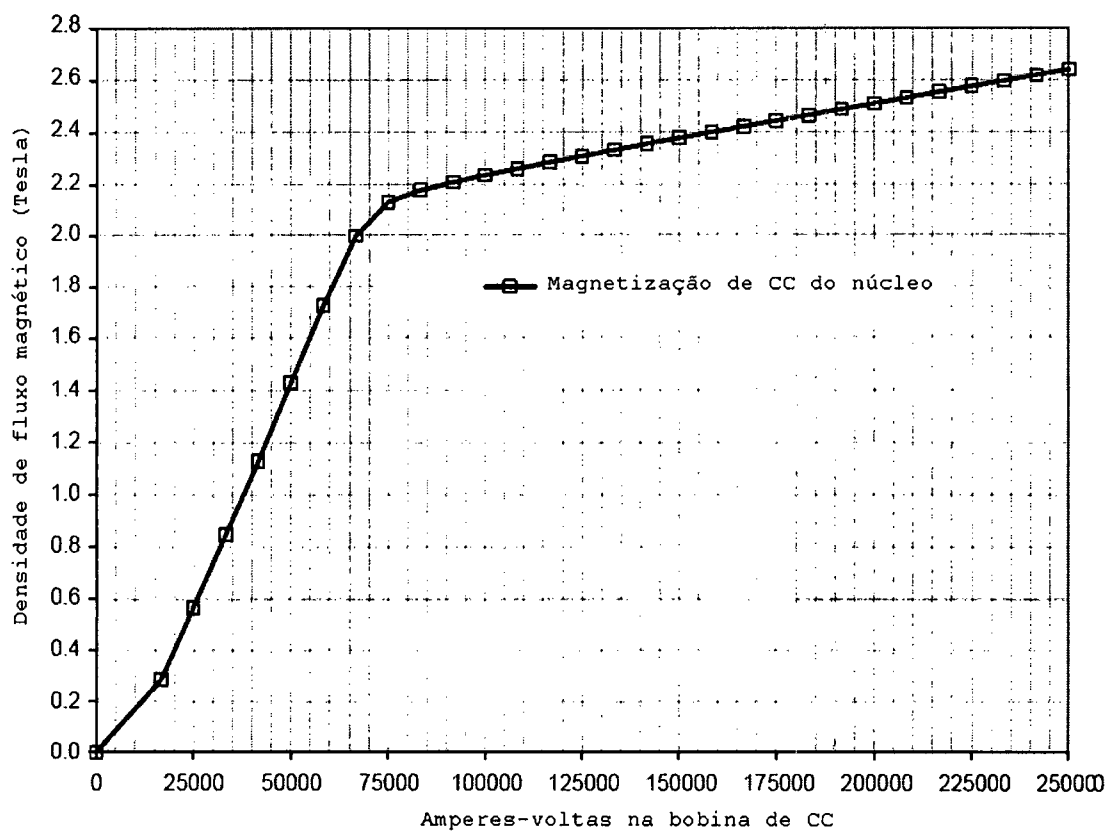


Fig. 11

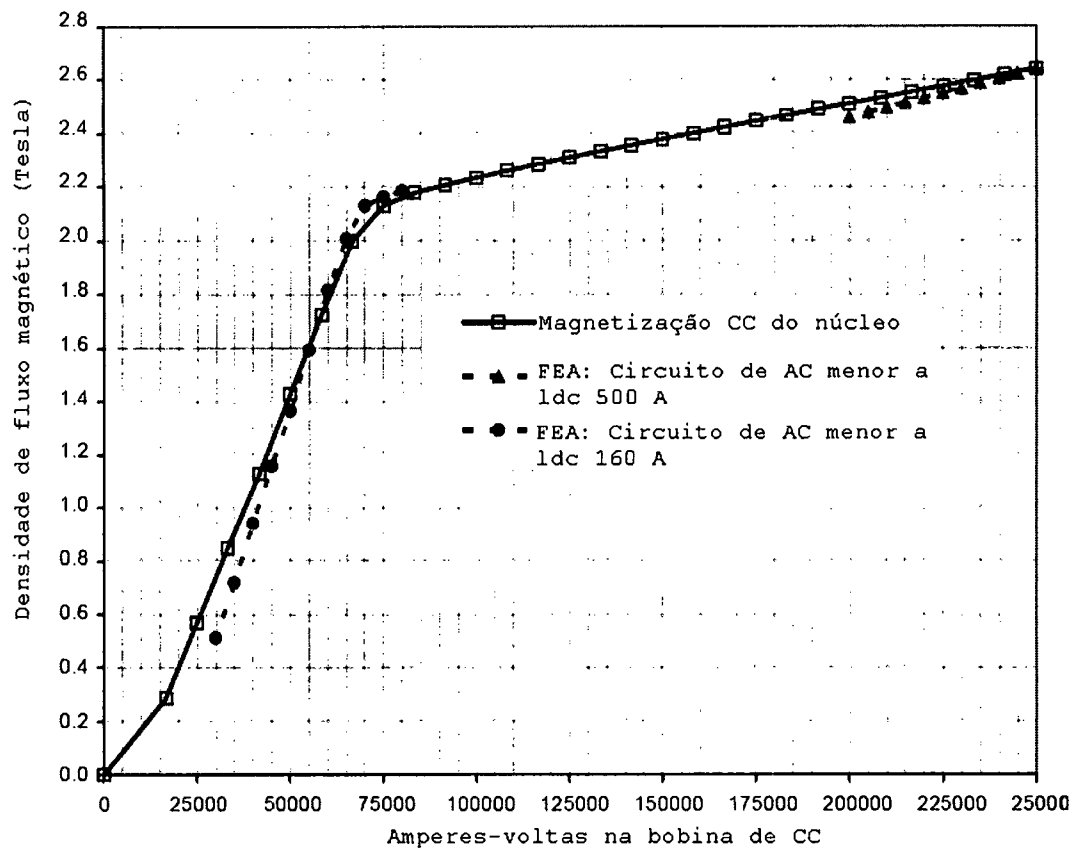


Fig. 12

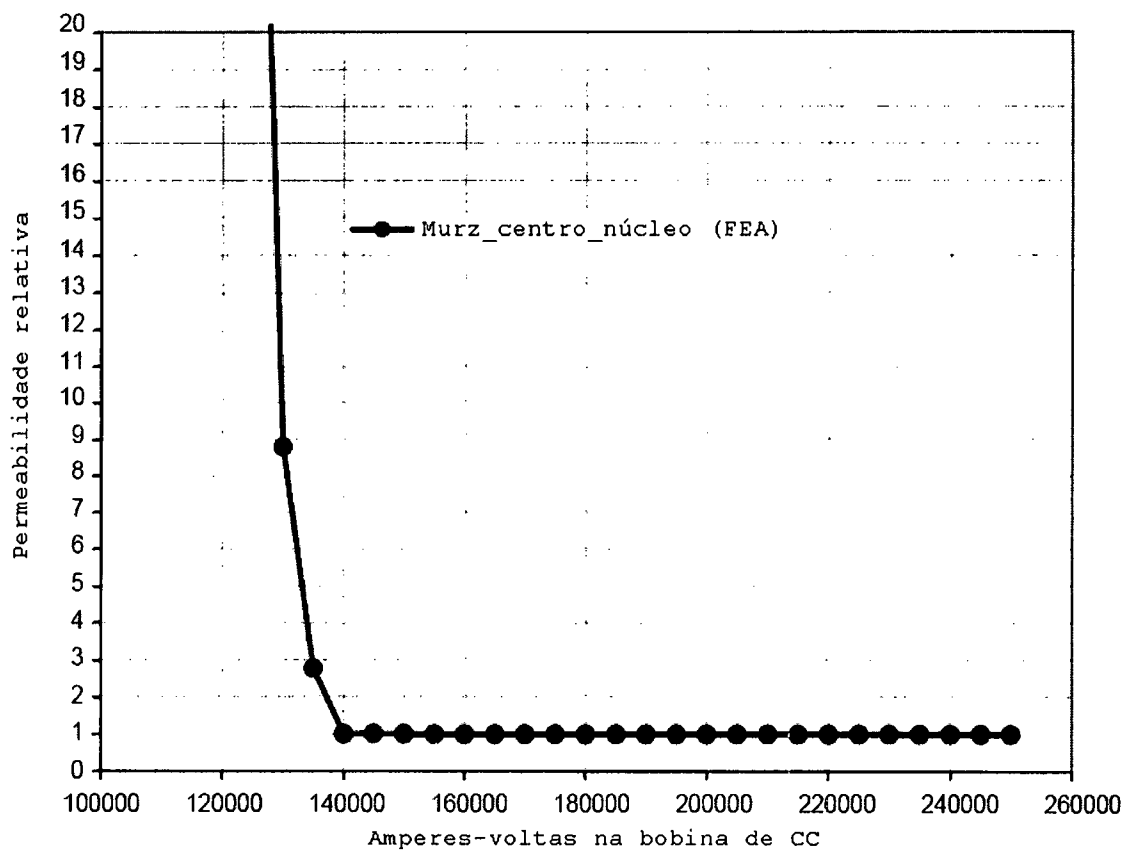


Fig. 13

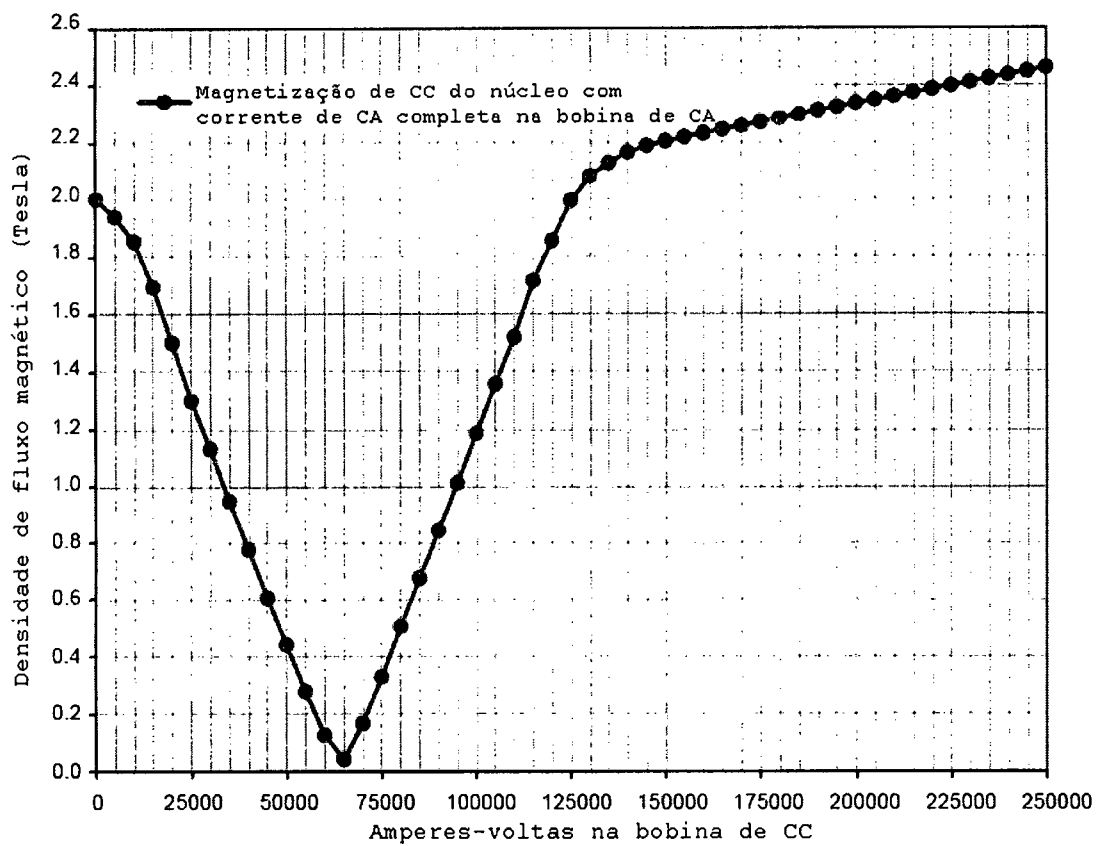


Fig. 14

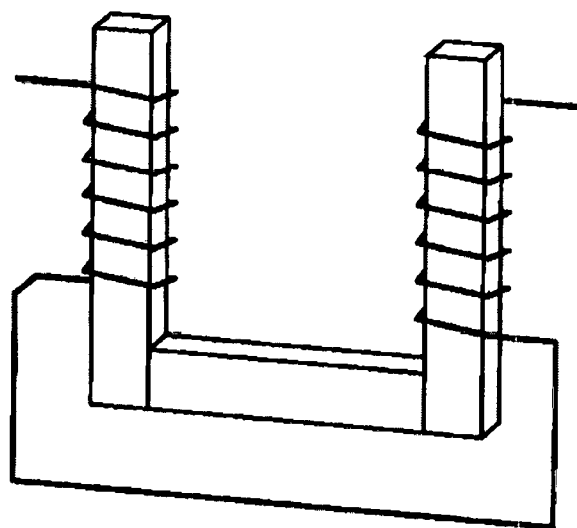


Fig. 15

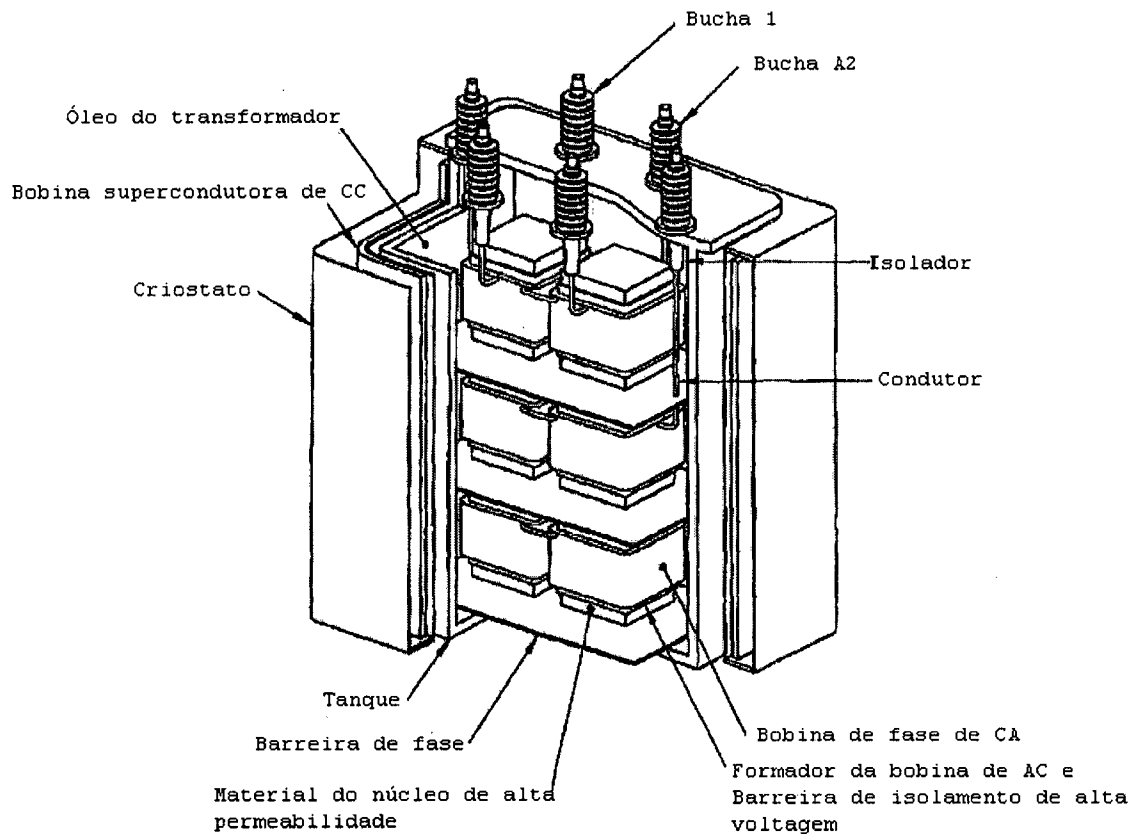


Fig. 16

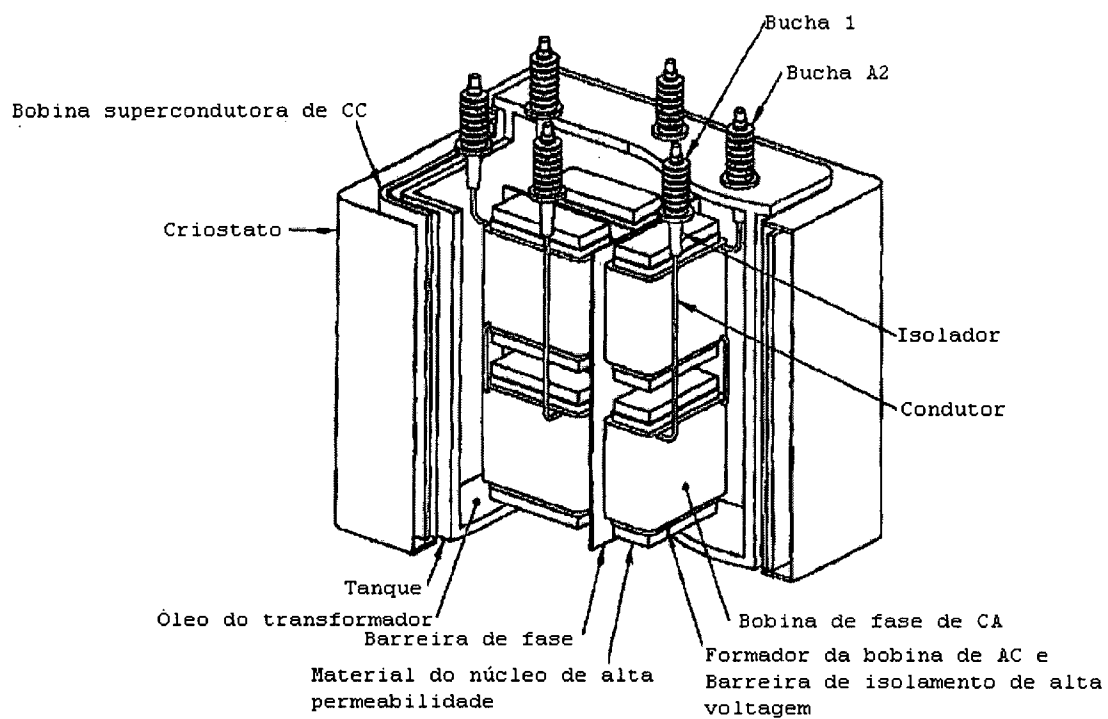


Fig. 17

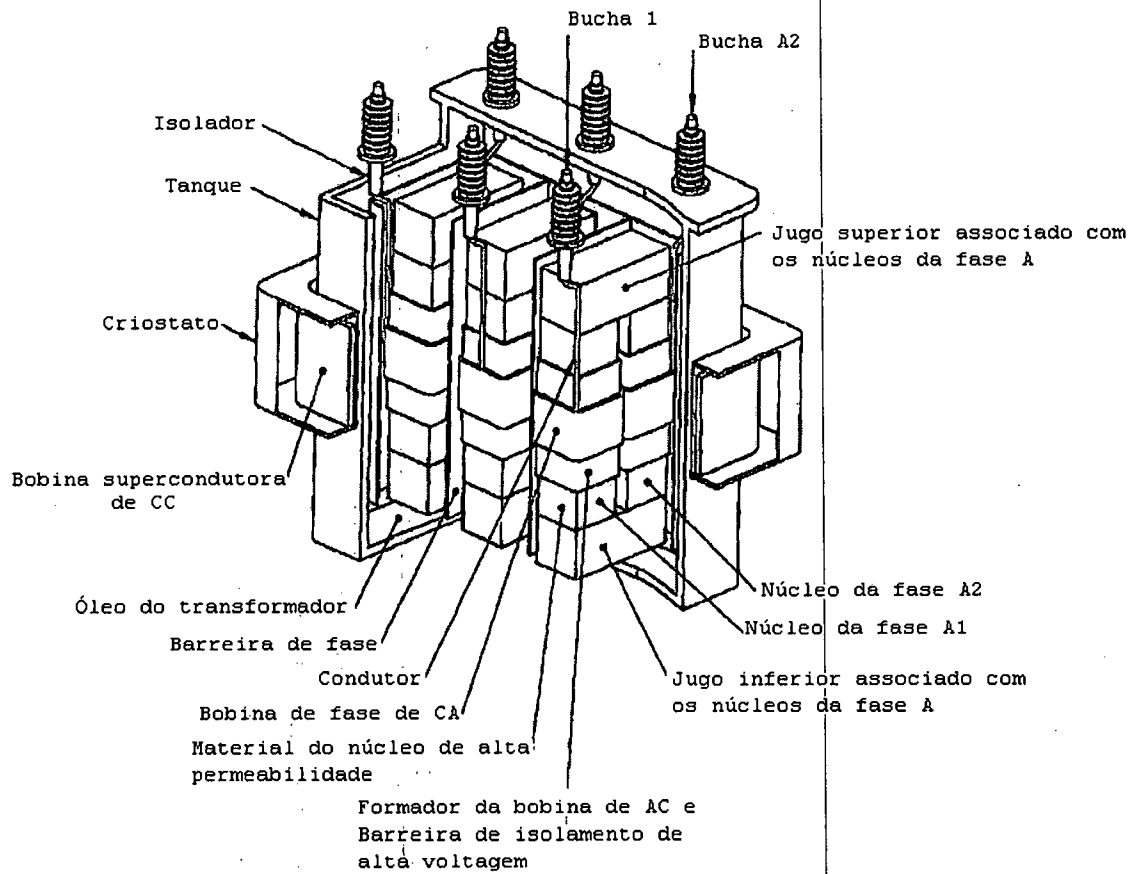


Fig. 18

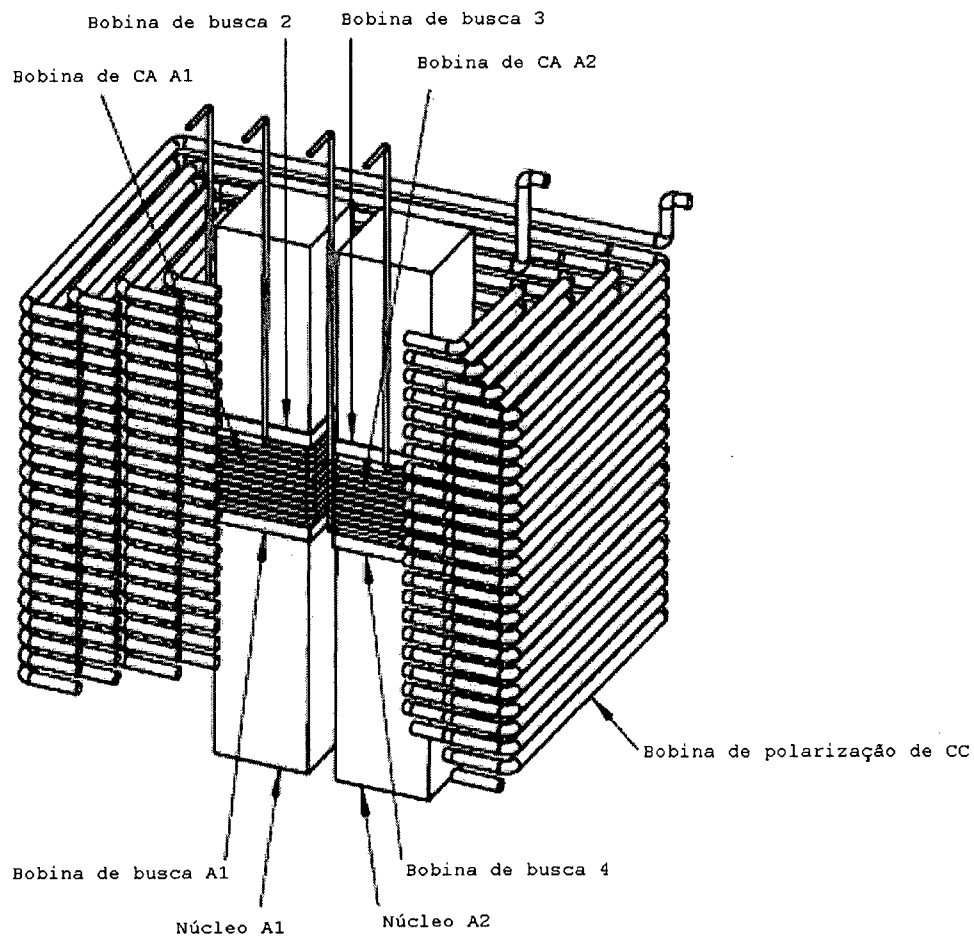


Fig. 19

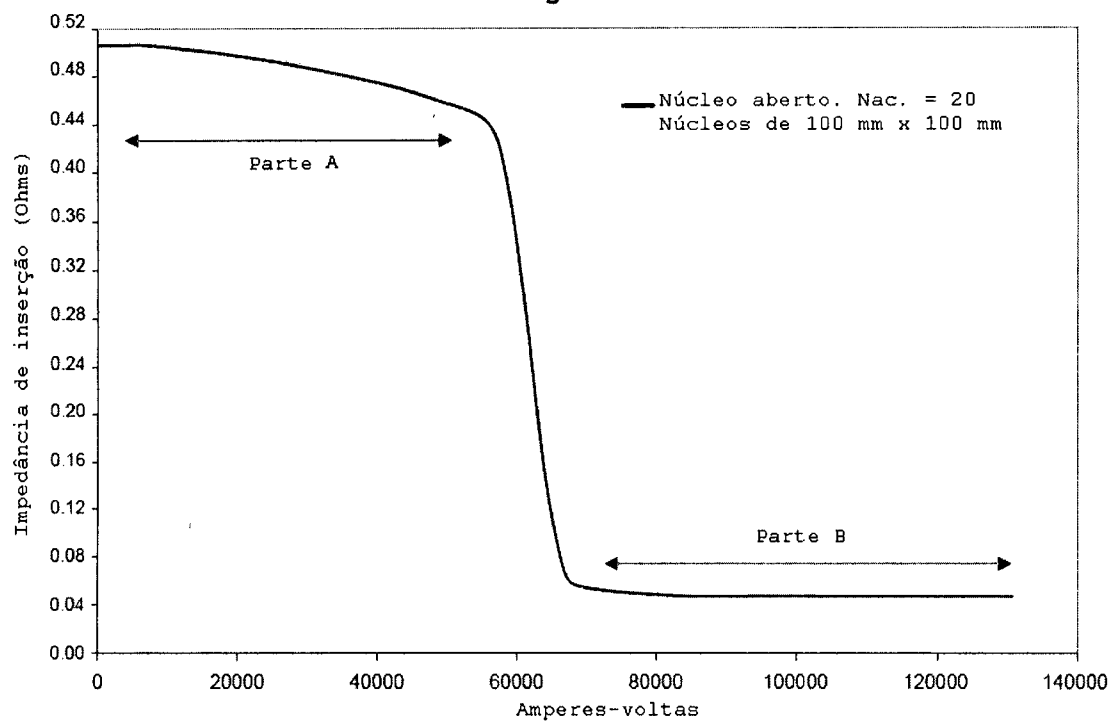


Fig. 20

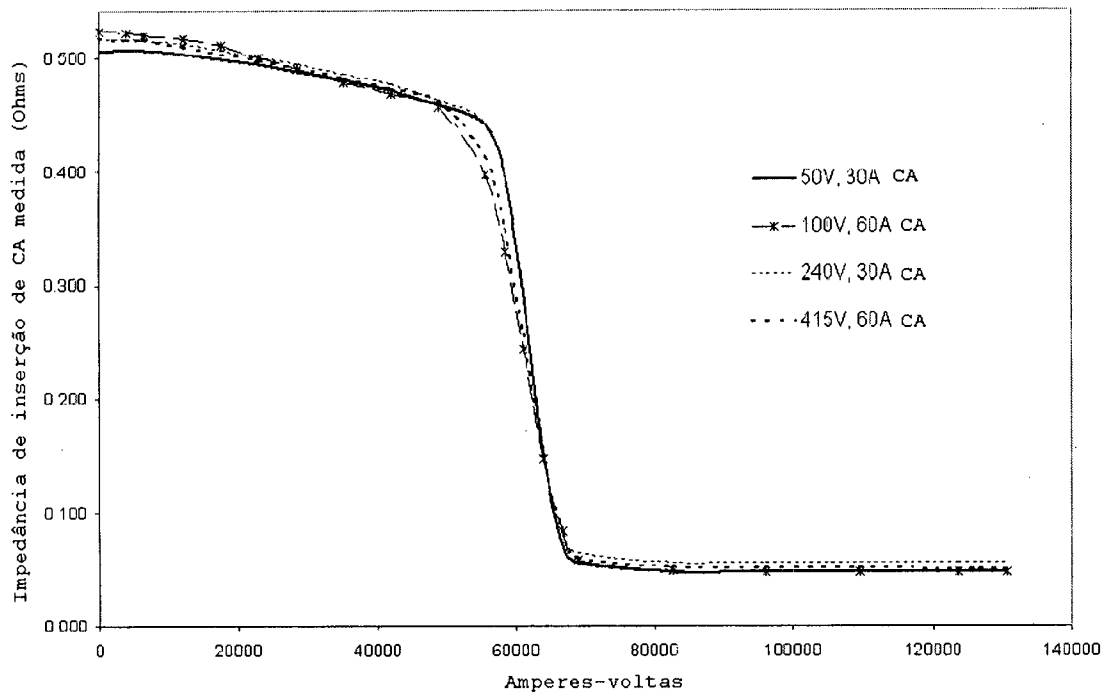


Fig. 21

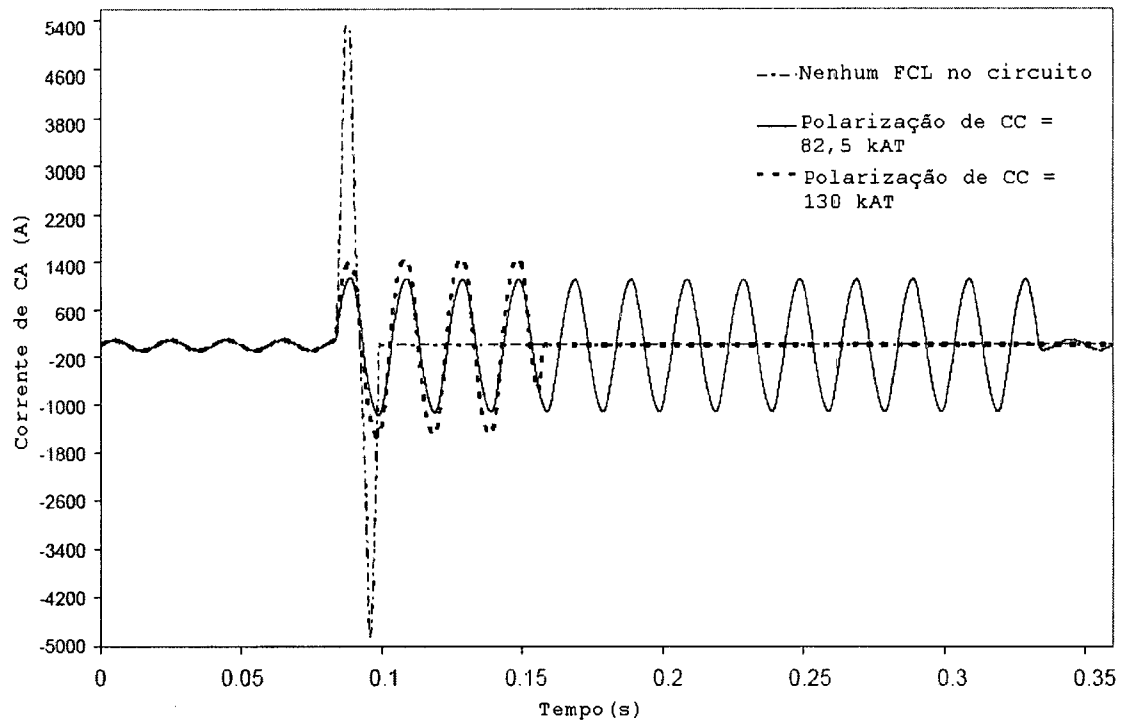


Fig. 22

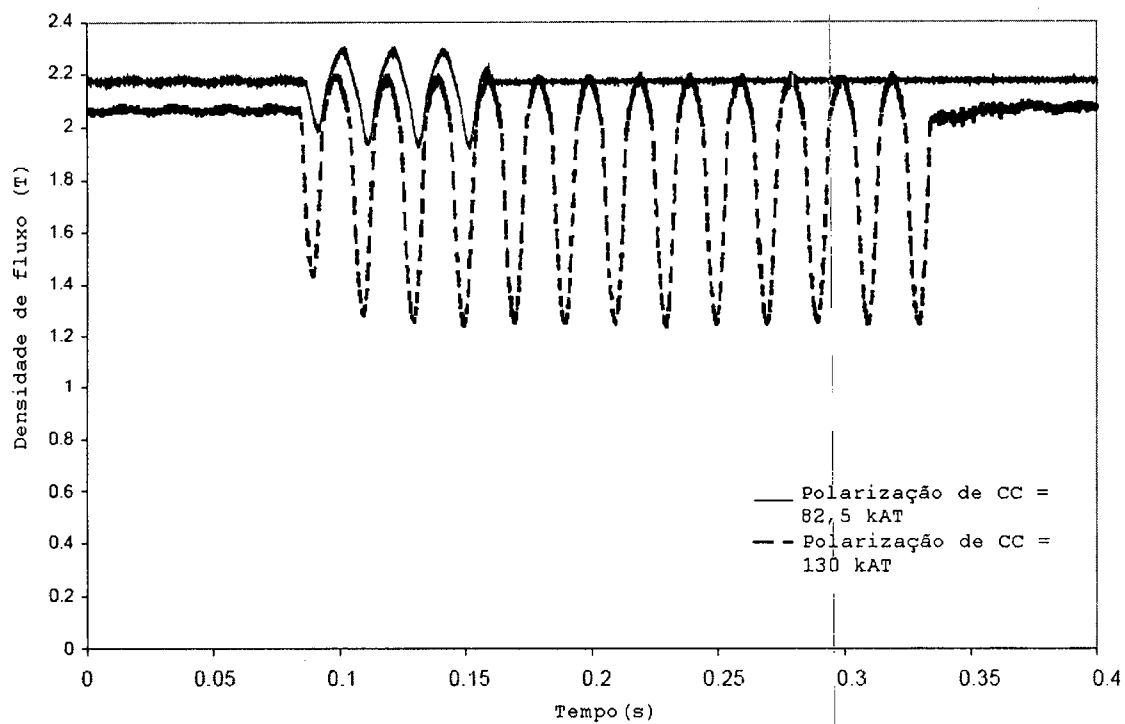


Fig. 23

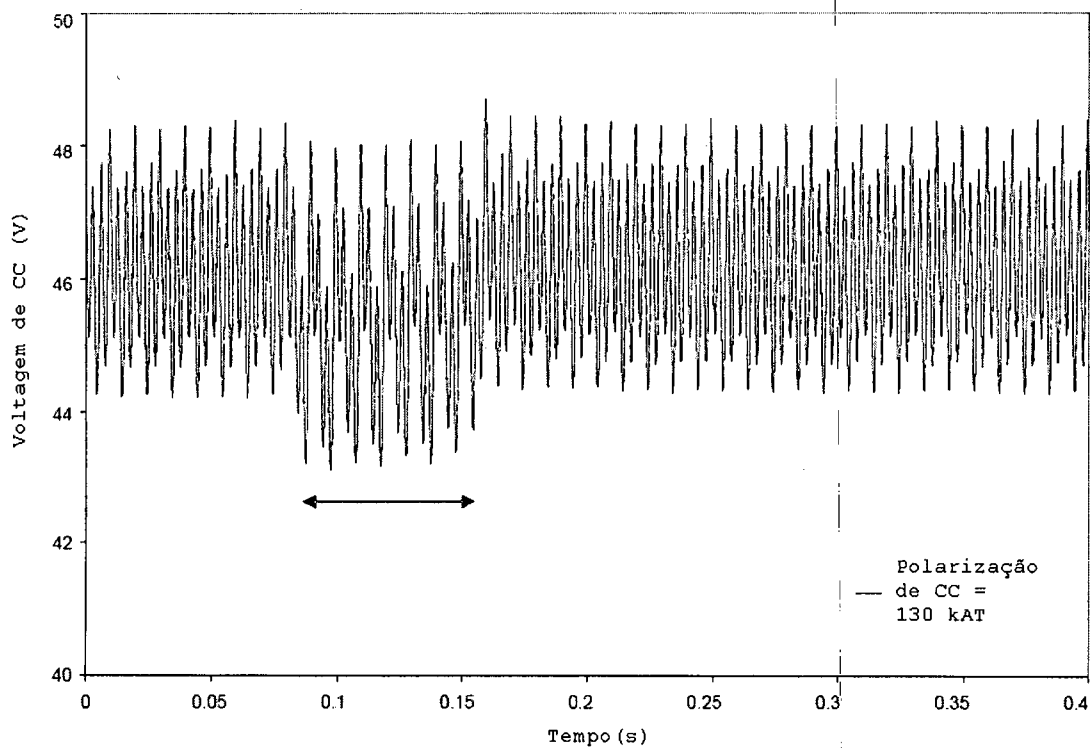


Fig. 24

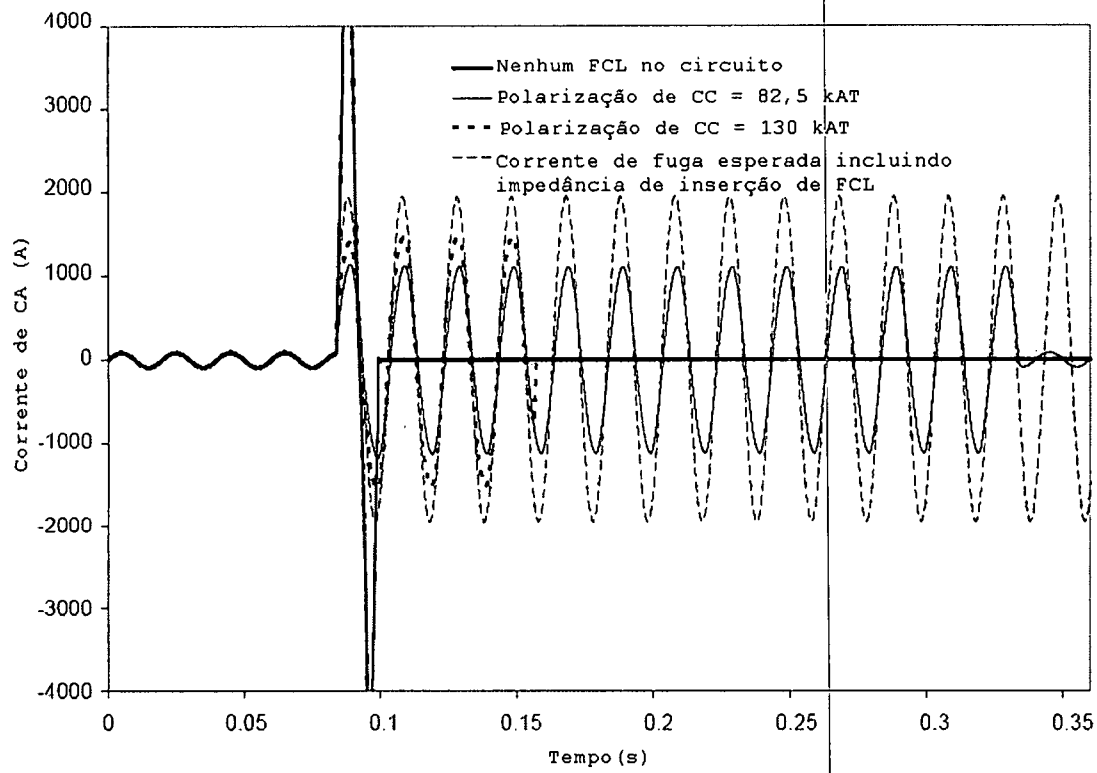


Fig. 25

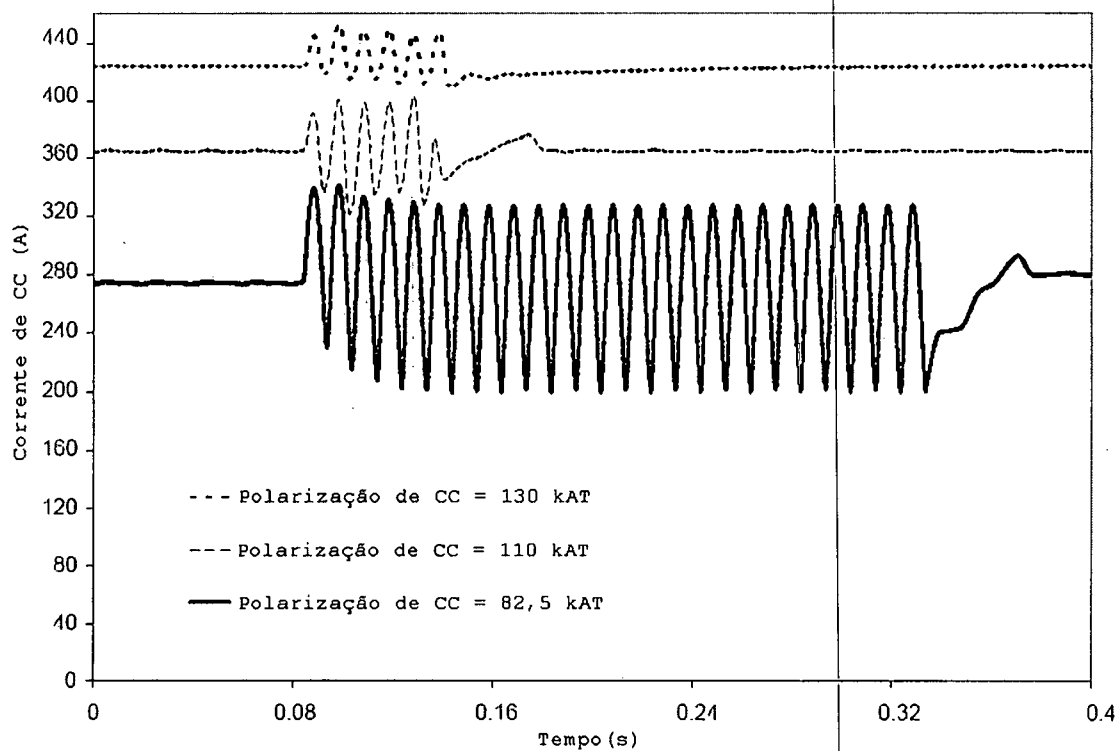


Fig. 26

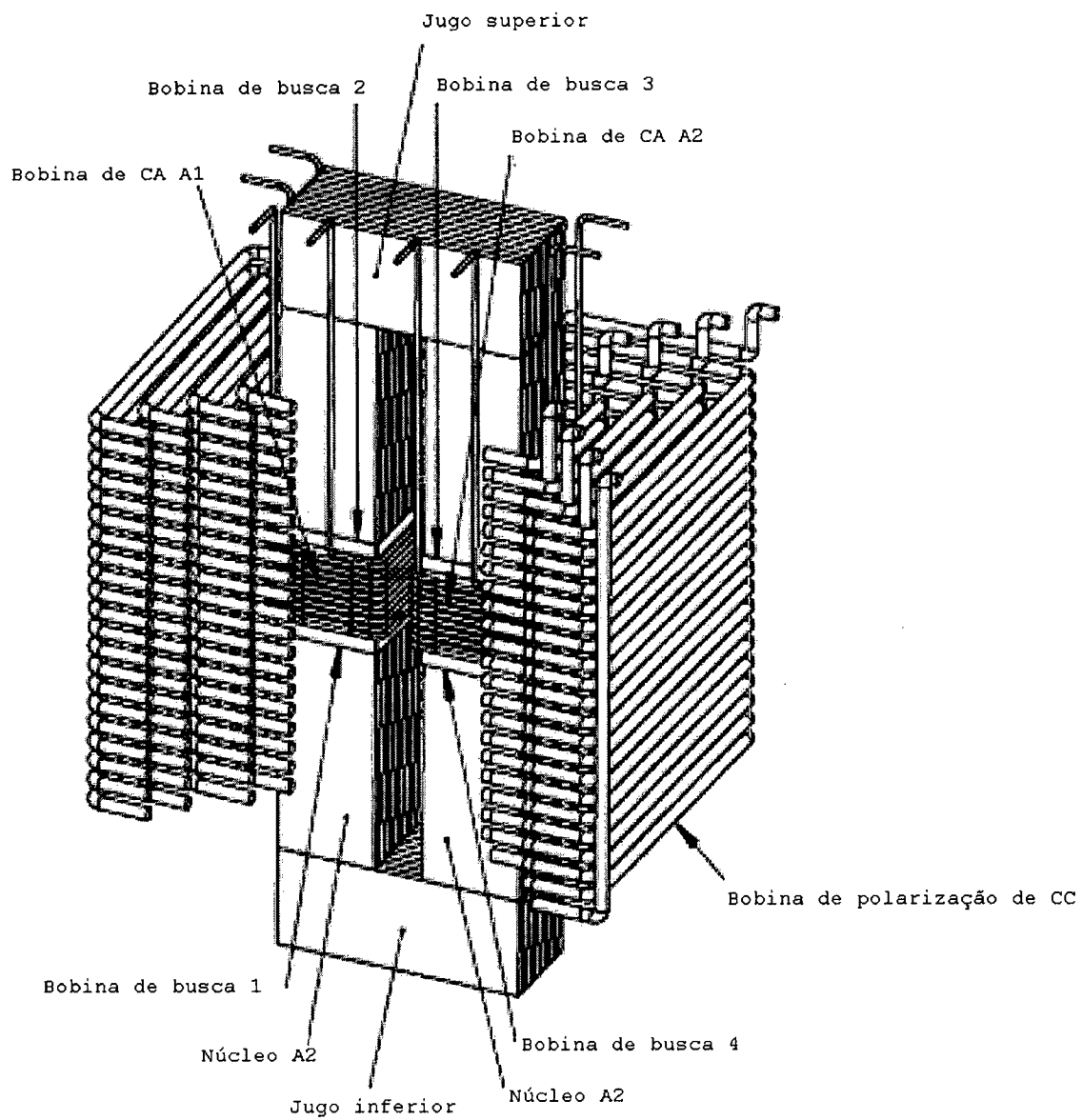


Fig. 27

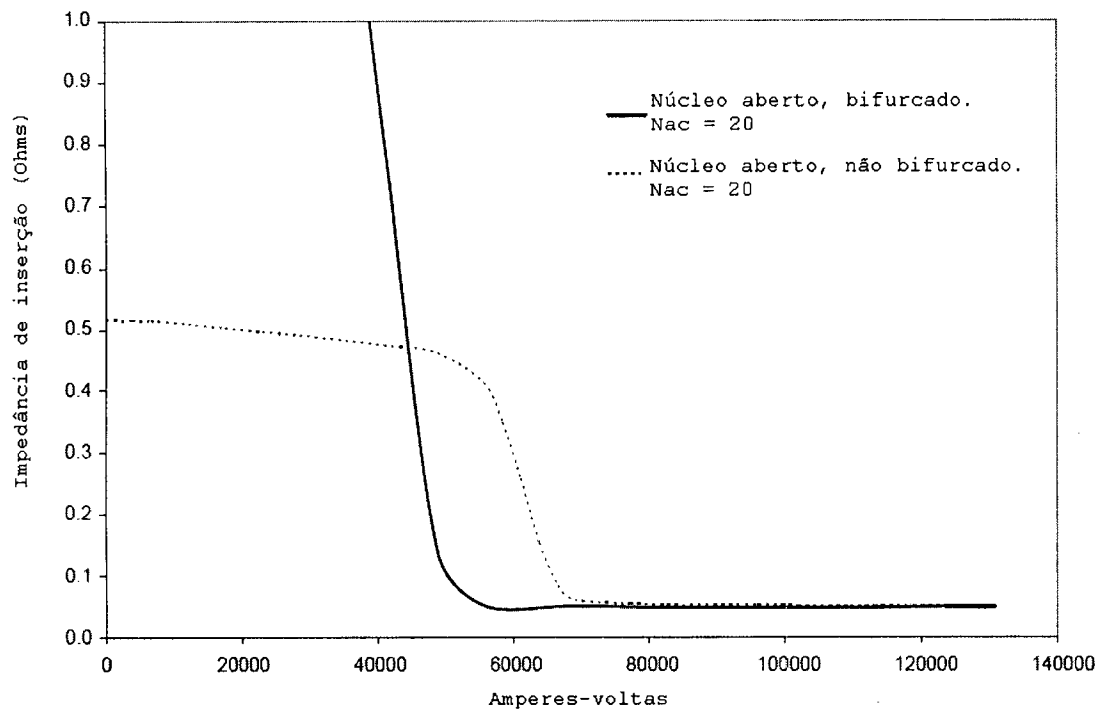


Fig. 28

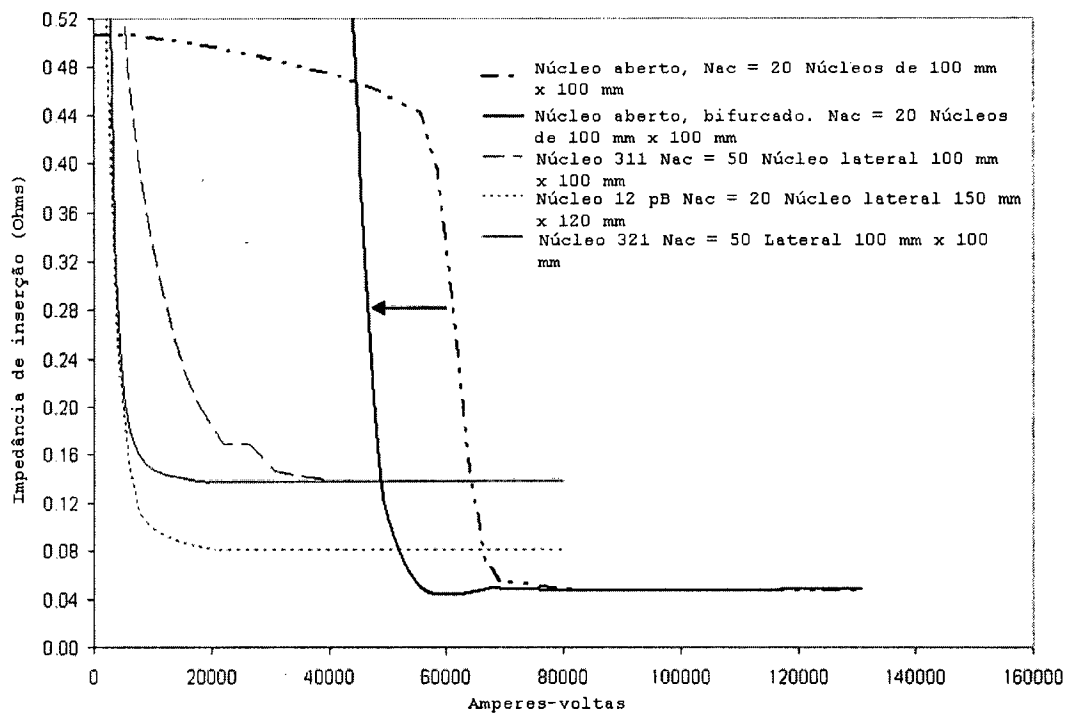


Fig. 29

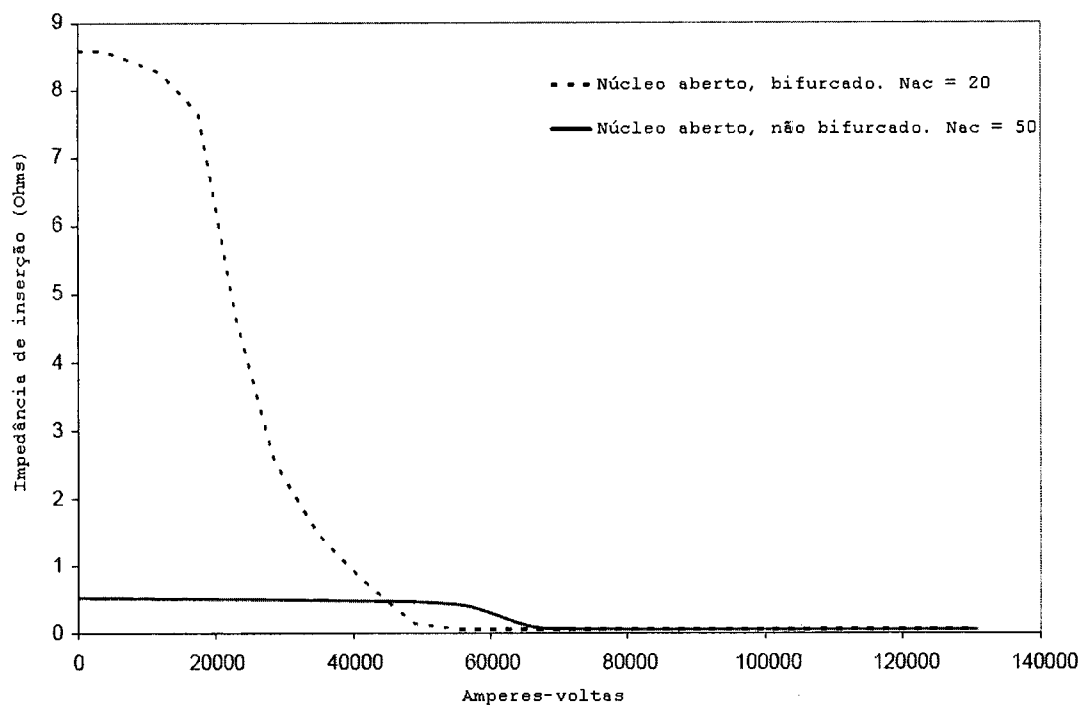


Fig. 30

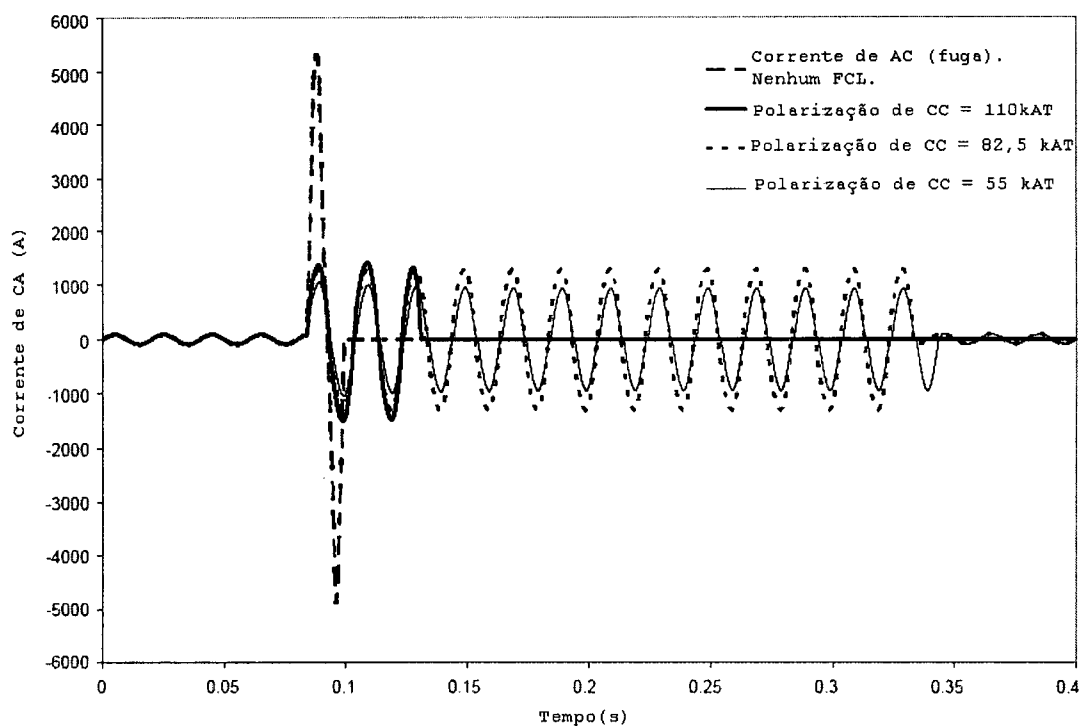


Fig. 31

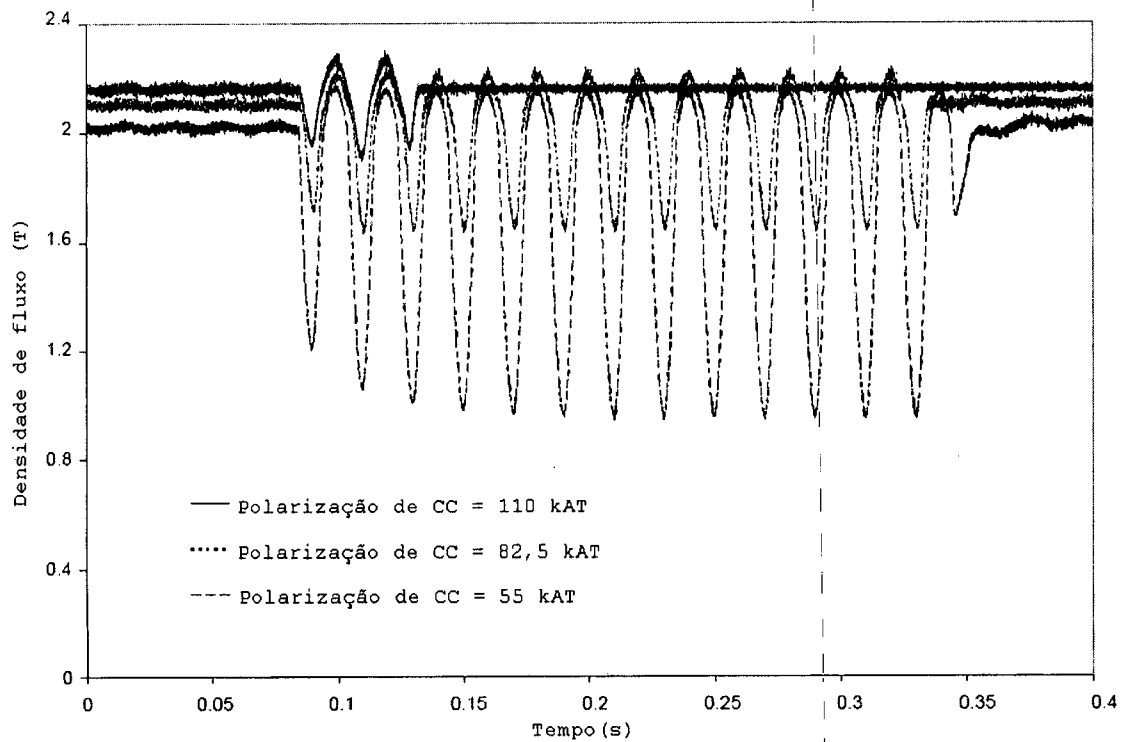


Fig. 32

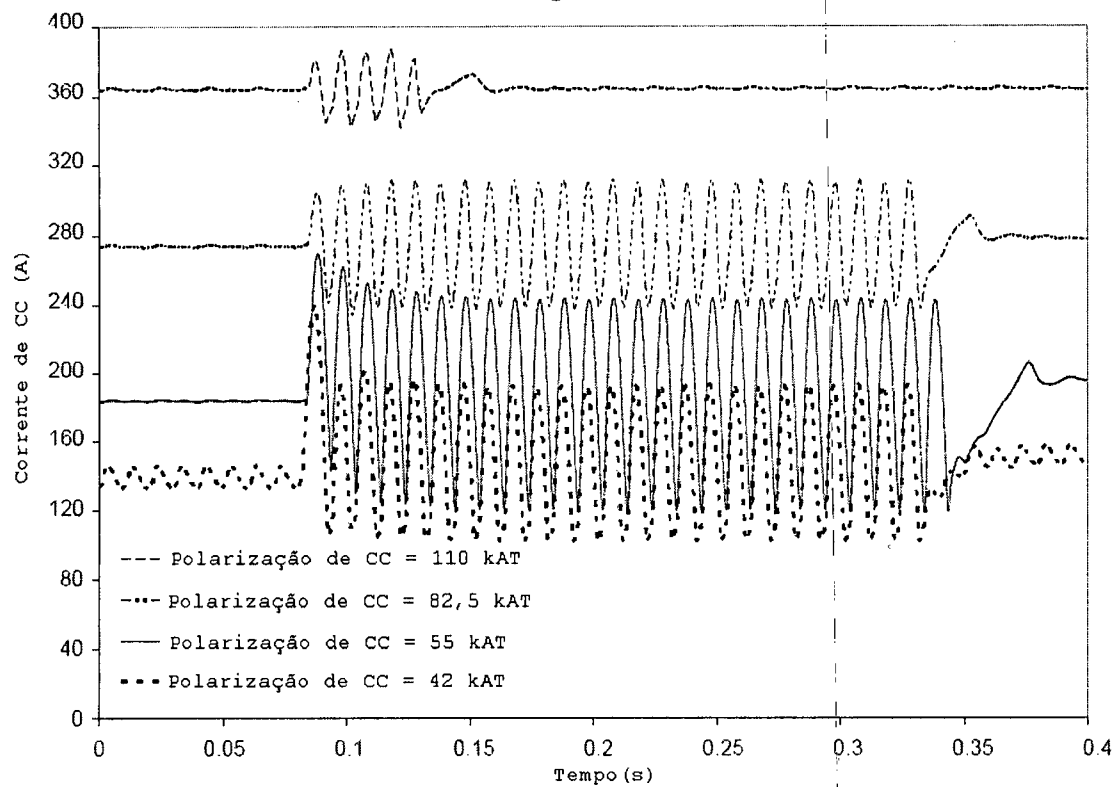


Fig. 33

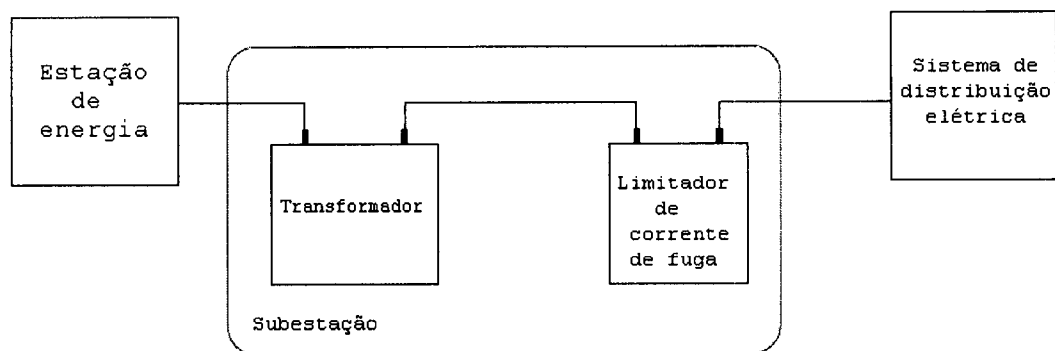


Fig. 34

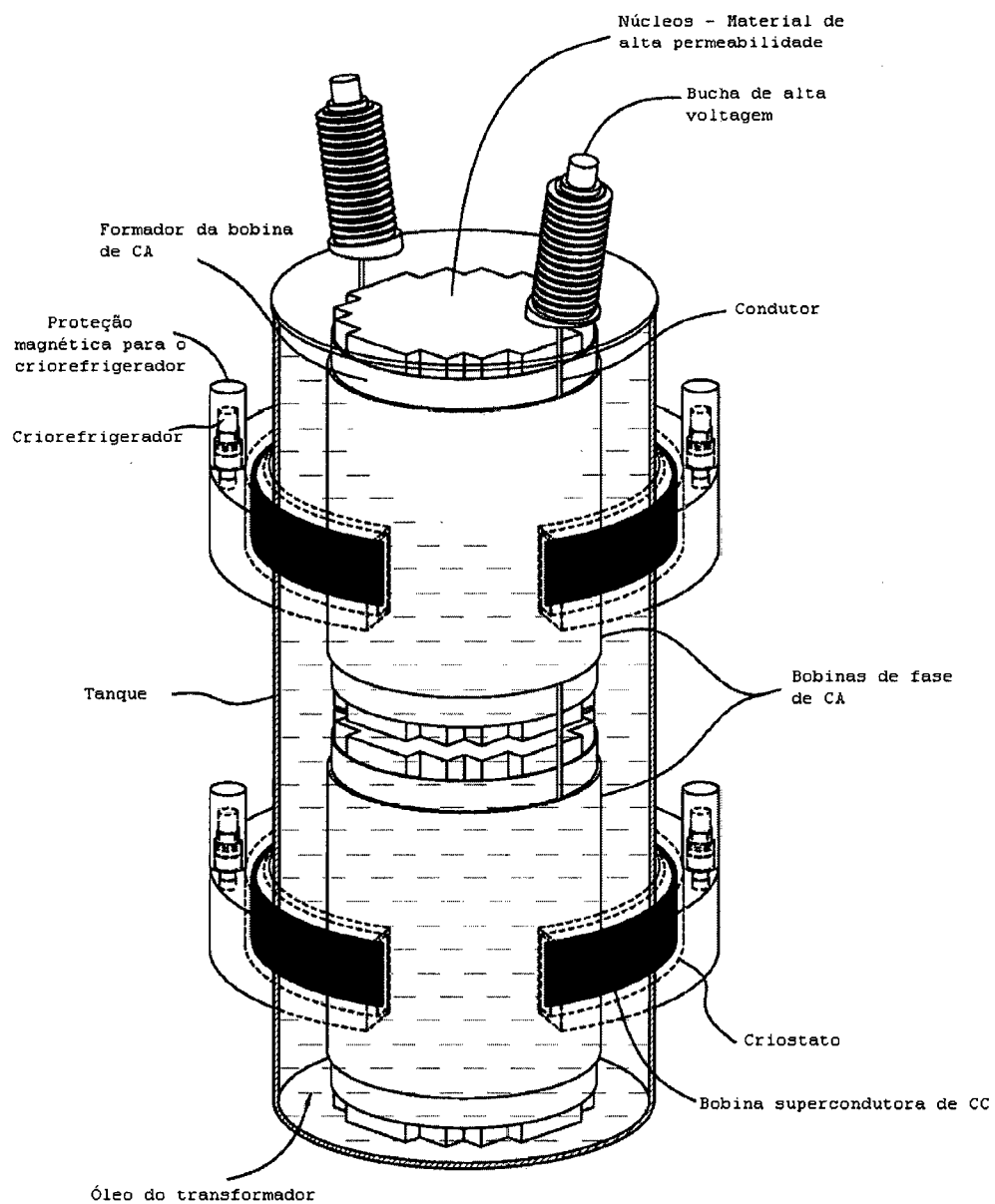


Fig. 35

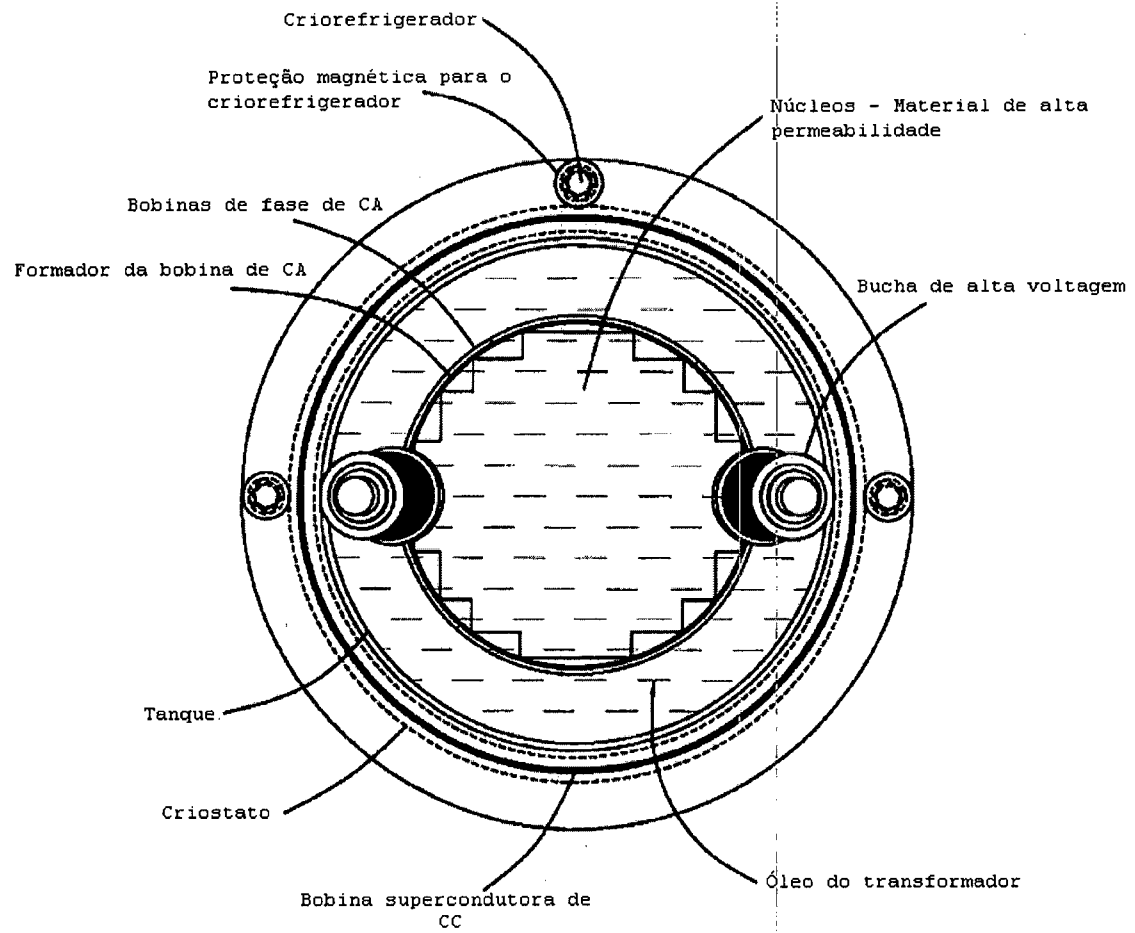


Fig. 36

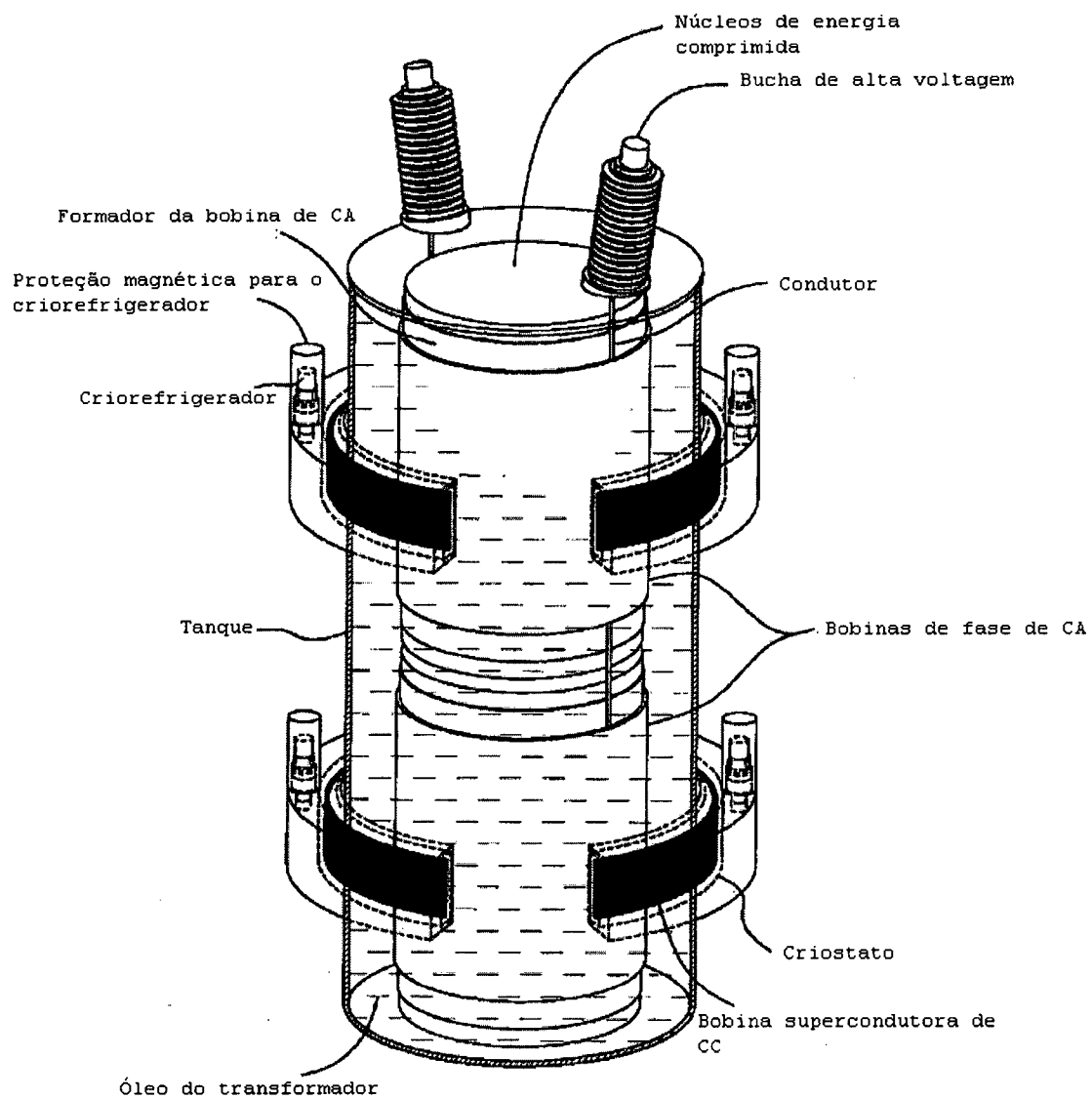


Fig. 37

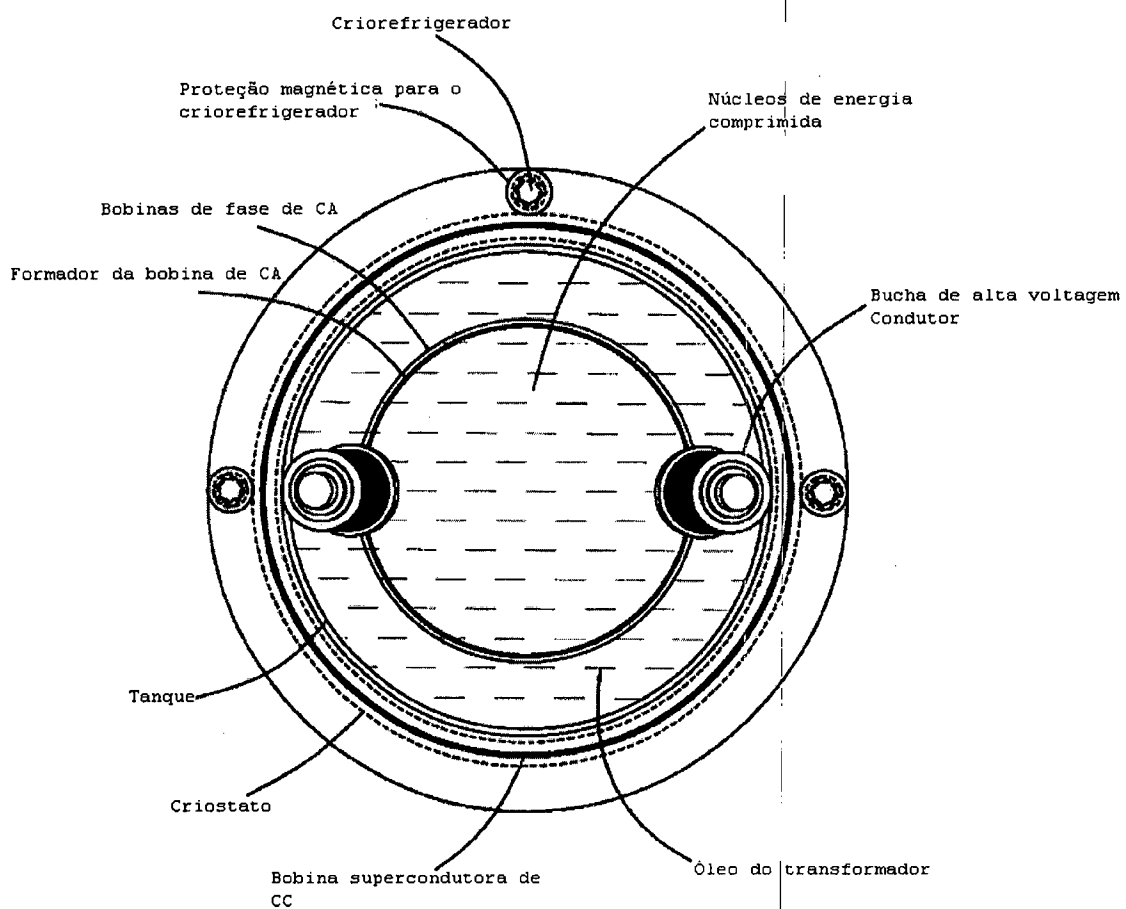


Fig. 38

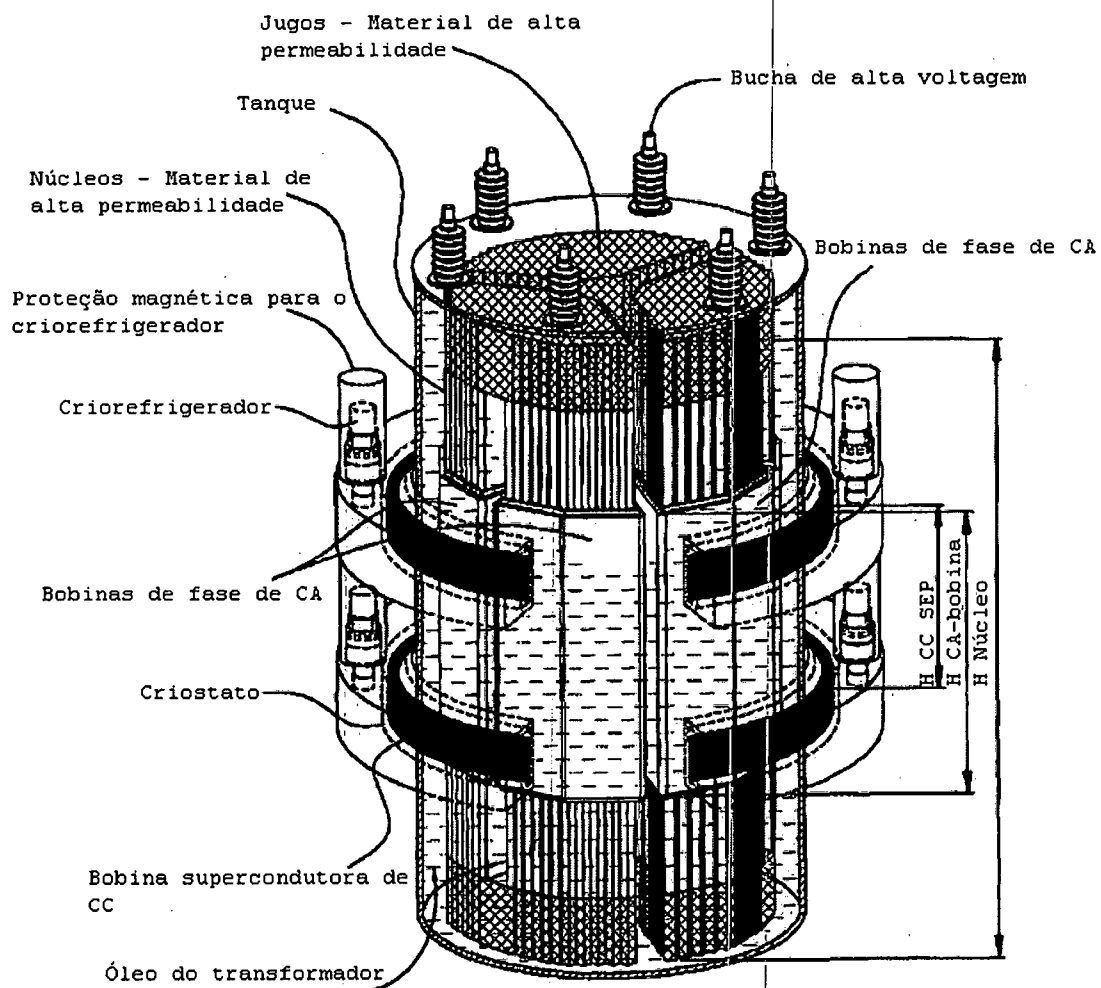


Fig. 39

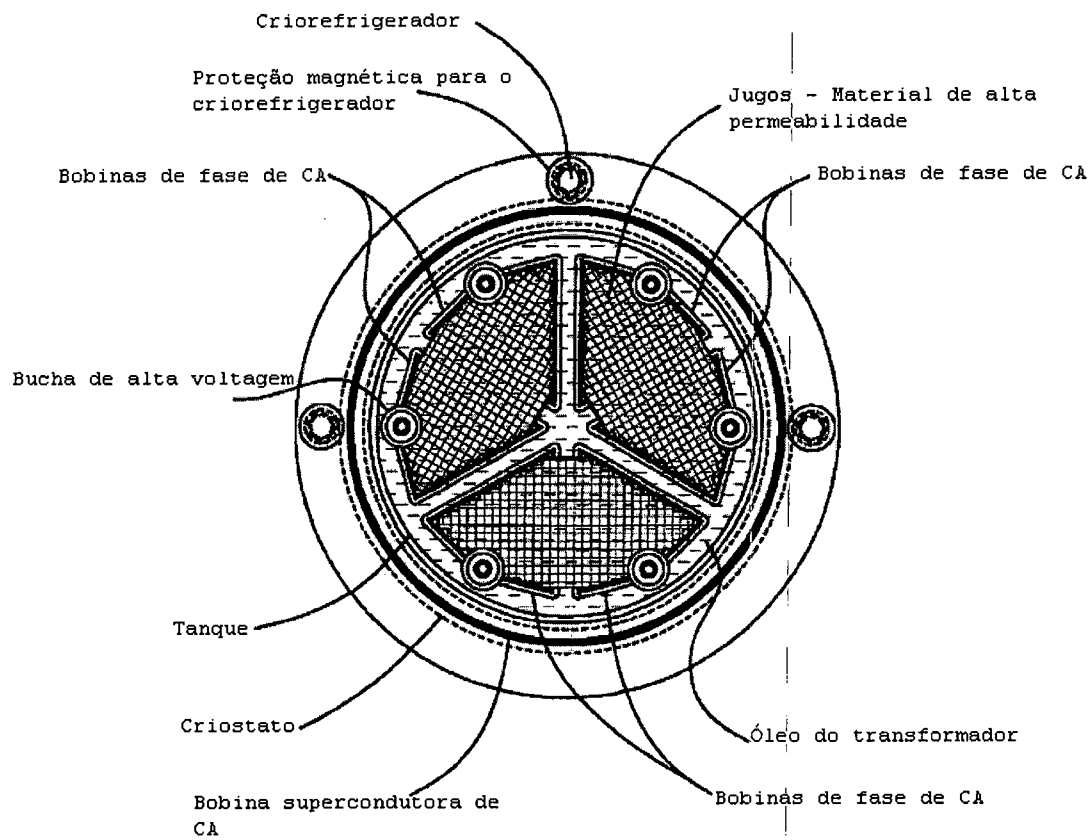


Fig. 40

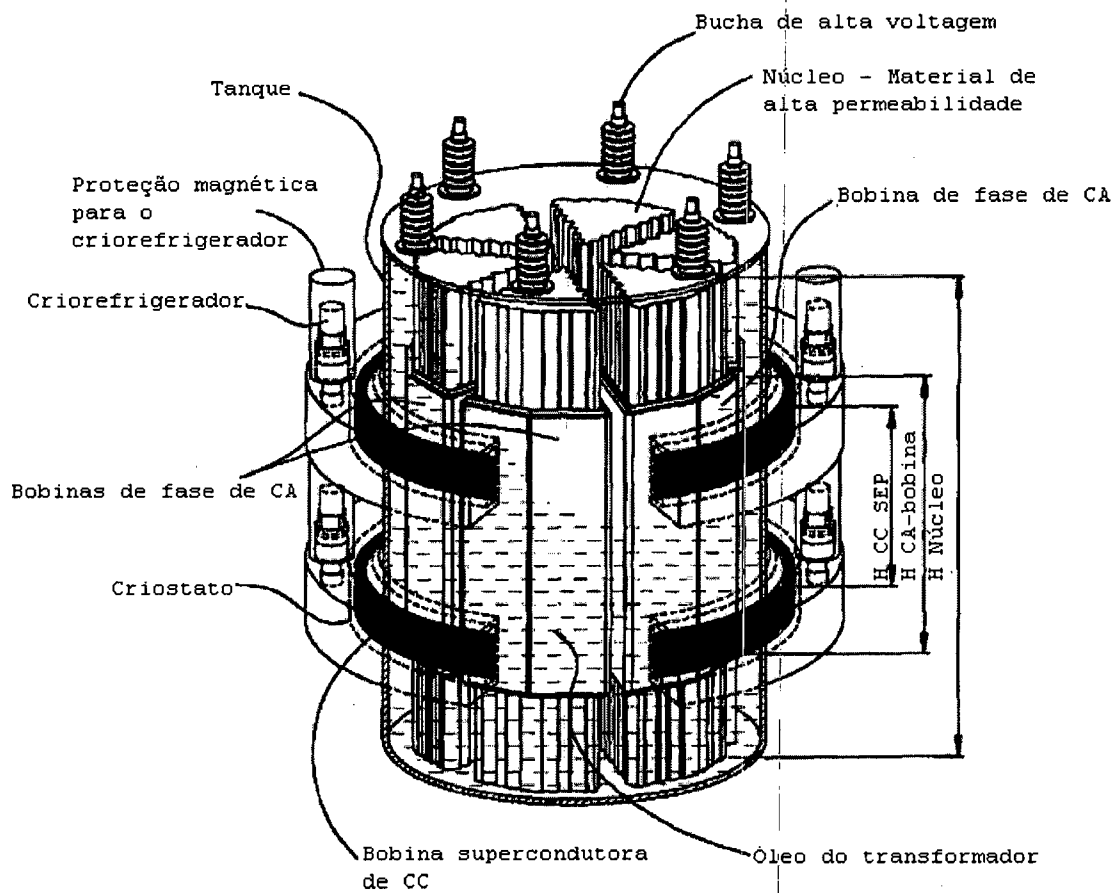


Fig. 41

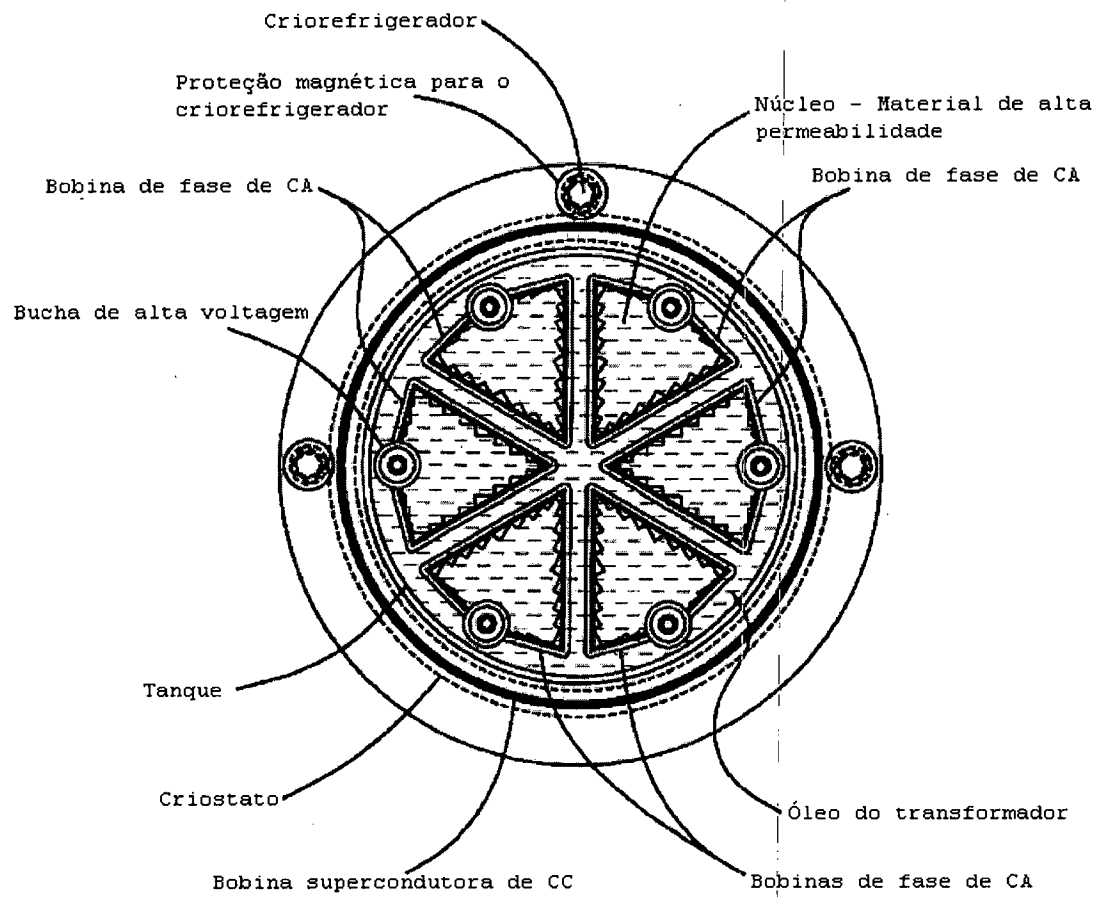


Fig. 42

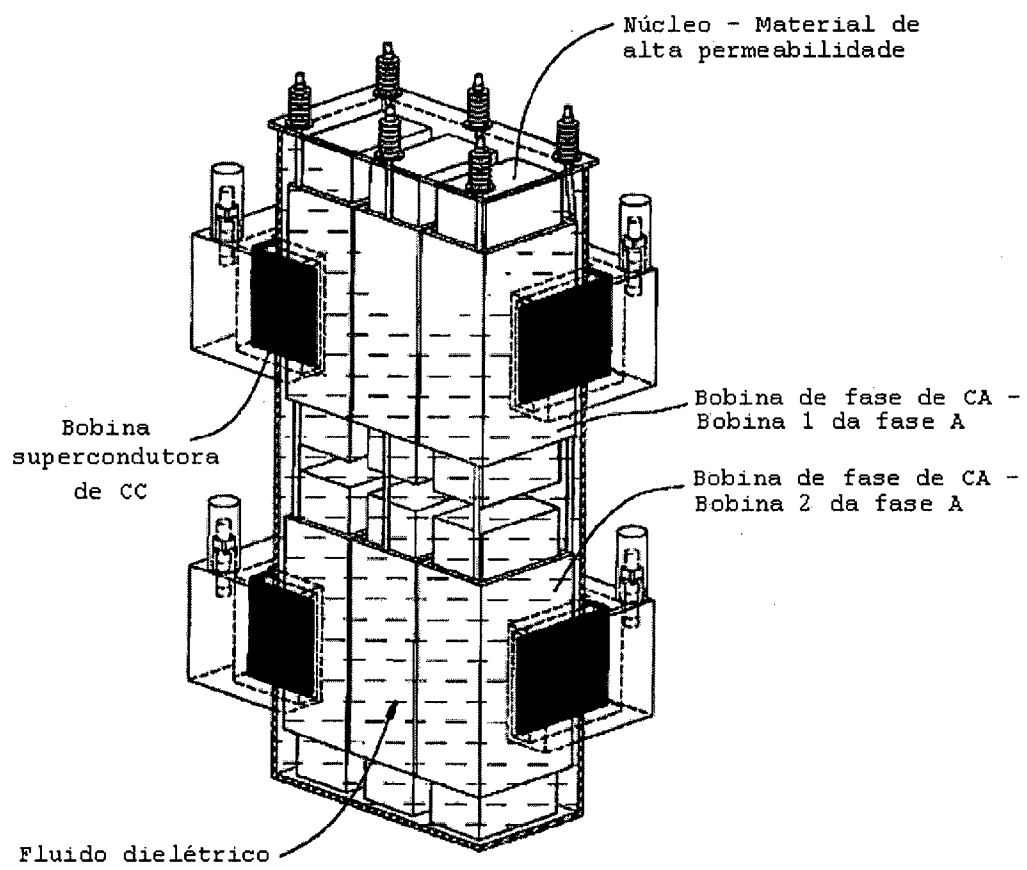


Fig. 43

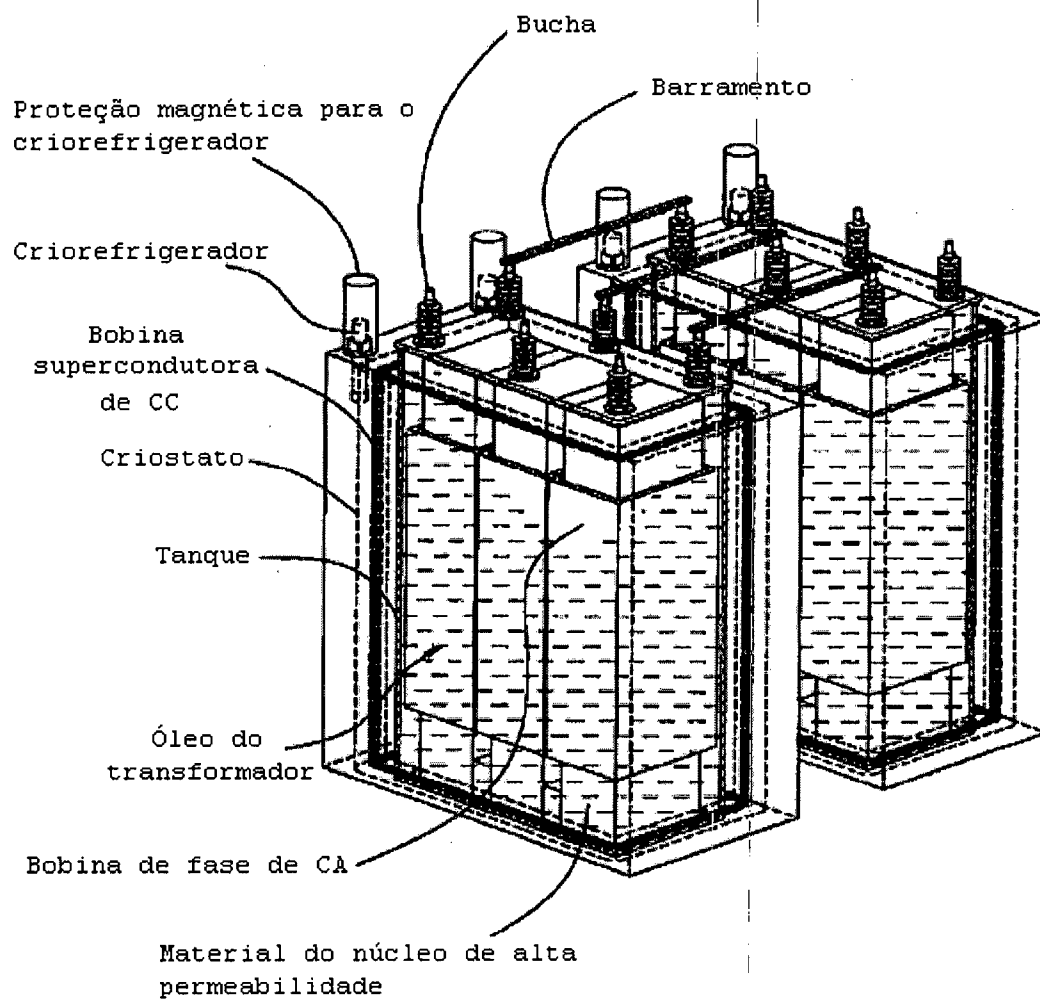


Fig. 44

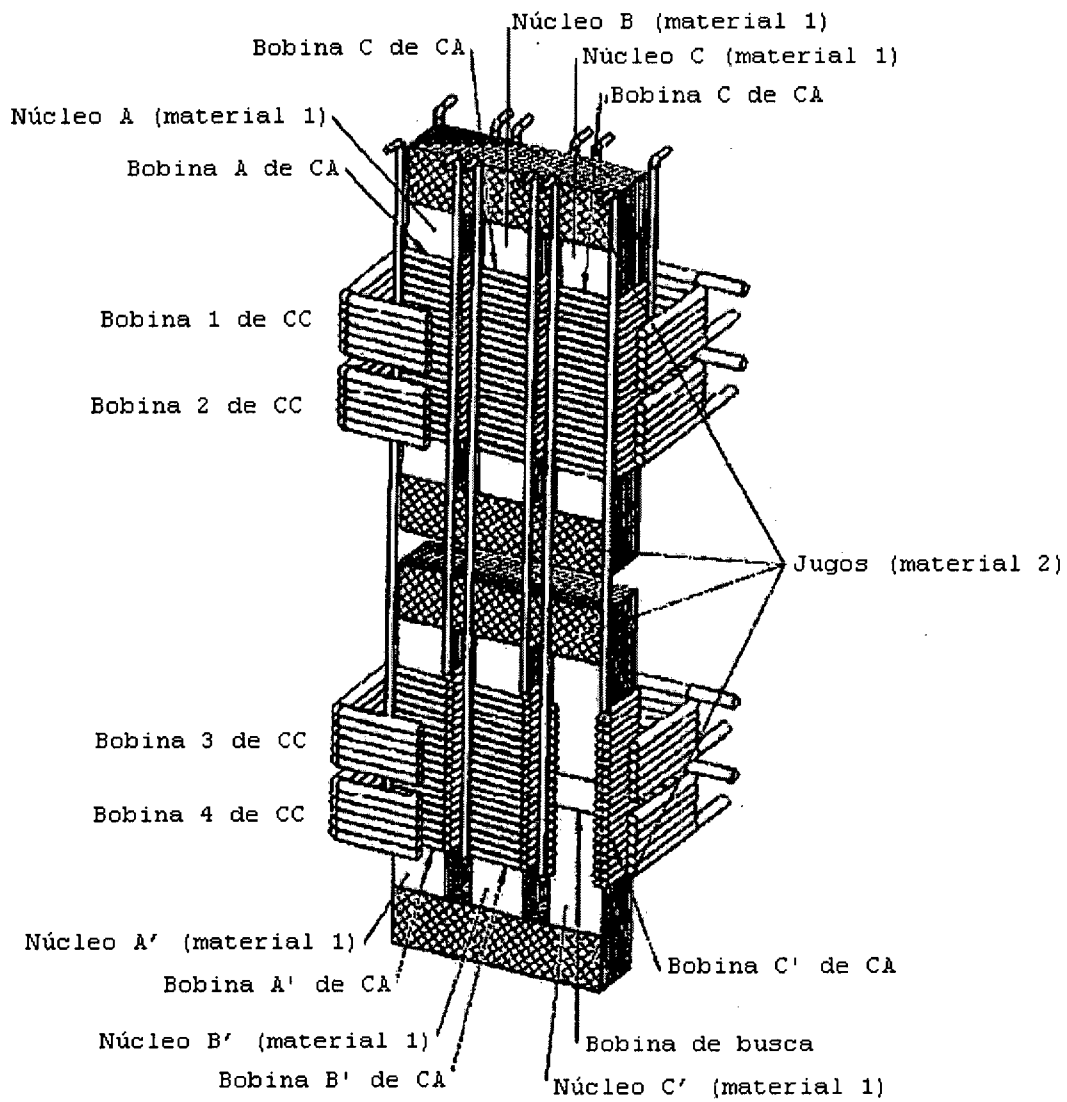


Fig. 45

RESUMOLIMITADOR DE CORRENTE DE FUGA PARA INCORPORAÇÃO EM
UM CIRCUITO ELÉTRICO

Trata-se de um limitador de corrente de fuga (FCL) que inclui uma série de pinos de alta permeabilidade (1) para definir coletivamente um núcleo para o FCL. Uma bobina de CC (2), com a finalidade de saturar uma parte dos pinos de alta permeabilidade (1), circunda a estrutura completa fora de um invólucro na forma de um vaso (3). O vaso (3) contém um meio de isolamento dielétrico (4). As bobinas de CA (5), para transportar a corrente de AC, são enroladas em torno de formadores de isolamento (6) e interconectadas eletricamente uma a outra de uma maneira tal que os sentidos do campo magnético produzido por cada bobina de CA (5) no núcleo de alta permeabilidade correspondente são opostos. Há barreiras de isolamento (7) entre as fases para melhorar as propriedades de suporte dielétrico do meio dielétrico.