



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

(11) BR 112015003249-4 B1



(22) Data do Depósito: 29/08/2013

(45) Data de Concessão: 07/12/2021

(54) Título: APARELHO PARA ACELERAR E COMPRIMIR PLASMA

(51) Int.Cl.: H05H 1/54.

(30) Prioridade Unionista: 29/08/2012 US 61/694,550.

(73) Titular(es): GENERAL FUSION, INC..

(72) Inventor(es): MICHEL G. LABERGE; MERITT REYNOLDS.

(86) Pedido PCT: PCT CA2013050670 de 29/08/2013

(87) Publicação PCT: WO 2014/032186 de 06/03/2014

(85) Data do Início da Fase Nacional: 12/02/2015

(57) Resumo: APARELHO PARA ACELERAR E COMPRIMIR PLASMA. Exemplos de um aparelho de aceleração e de compressão de plasma são descritos. O aparelho inclui um acelerador de plasma com uma seção afunilada de alta compressão que se estende a partir de uma entrada do acelerador e uma seção alongada ligada à seção afunilada de alta compressão que pode estender-se desde a extremidade da seção afunilada de saída para um acelerador. A seção afunilada pode ser um cone com um afilamento íngreme, enquanto a seção alongada pode ter um leve, suave, diminuindo ao longo do seu comprimento em direção à saída. O dispositivo inclui ainda uma fonte de energia para fornecer um impulso de corrente para o acelerador, para gerar um fluxo de empuxo para acelerar e comprimir um toro de plasma ao longo do acelerador. O impulso de corrente pode ser então conformado, de modo que o impulso de corrente atrás do toro de plasma na saída da seção alongada é significativamente menor do que o impulso de corrente na primeira extremidade da seção alongada, enquanto a pressão do toro de plasma na saída da seção alongada é maior do que a pressão do toro de plasma no início da seção (...).

Relatório Descritivo de Patente de Invenção para: "**APARELHO PARA ACELERAR E COMPRIMIR PLASMA**".

Referência Cruzada para Pedidos Relacionados

[001] Este pedido reivindica o benefício sob 35 USC § 119 (e) do pedido de patente provisório norte-americano No. US 61/694,550, depositado em 29 de agosto de 2012, intitulado "HIGH EFFICIENCY PLASMA ACCELERATOR", o qual é aqui incorporado por referência na sua totalidade.

Campo da Invenção

[002] A presente descrição se refere de uma forma genérica a um método e sistema para a aceleração e compressão de plasma e, mais particularmente, refere-se a um acelerador de plasma de alta eficiência e um método para acelerar o plasma.

Antecedentes da Invenção

[003] Plasma é um estado da matéria similar ao gás na qual pelo menos uma parte das partículas são ionizadas. A presença de partículas carregadas (por exemplo, íons positivos e elétrons negativos) faz com que o plasma seja eletricamente condutor. Um toro de plasma é um plasma magnetizado auto-sustentado em uma configuração em forma toroidal, com poloidais e toroidais ligados (em alguns casos) fechado os fluxos magnéticos. A exvoltagem da ligação dos fluxos magnéticos poloidais e toroidais define uma configuração helicoidal de toro de plasma. Toro plasma

contido em um simples volume conexado é chamado de toroid compacto (CT). A configuração CT pode incluir, por exemplo:

(i) uma configuração esferomak que existe uma estreita para um equilíbrio estável magneto com um campo magnético interno tendo ambos componentes toroidal e poloidal; ou (ii) um campo de configuração invertida (CRF), que também tem uma topologia magnética toroidal, mas pode ser mais alongada na direção axial, com uma superfície exterior sendo semelhante a uma elipsóide alongada, e que tem essencialmente um campo magnético poloidal, com nenhum componente do campo magnético toroidal. Plasmas de CT pode ser formada em uma variedade de configurações magnéticas, incluindo as que existem em estados que estão em FRC entre esferomak e estados. É também possível para um toro de plasma inicial evoluir e alterar a sua configuração magnética durante o tempo.

Sumário da Invenção

[004] De acordo com um aspecto, um dispositivo de aceleração e compressão de plasma é fornecido. O dispositivo compreende um acelerador para acelerar o plasma e compressão de um toro de plasma e uma fonte de alimentação para fornecer um impulso de aceleração elétrica para o acelerador, que produz uma corrente que flui no acelerador e gera um fluxo magnético que empurra para trás o toro de plasma que seja suficiente para acelerar e comprimir o toro de plasma em todo o acelerador.

[005] O acelerador tem um eletrodo tubular exterior e um eletrodo interior tubular que se estende no interior do eletrodo exterior, em que os eletrodos exteriores e interiores definem um canal anelar de propagação de plasma para acelerar e comprimir um toro de plasma através da mesma. O canal de propagação de plasma tem uma extremidade de entrada para receber o toro plasma a partir de um gerador de plasma e terminar em uma saída para descarregar o toro de plasma que foi acelerado e compactado dentro do canal anular. O canal de propagação de plasma tem uma seção alongada longitudinalmente com uma extremidade a montante em comunicação fluídica com a entrada e uma extremidade a jusante em comunicação fluídica com a saída. Um espaço anular em corte transversal definida como uma distância radial entre os eletrodos interno e externo diminui de forma não linear em direção a jusante ao longo do comprimento da seção alongada. O aparelho é configurado para ter uma indutância suficiente antes da seção alongada que o toro de plasma é acelerado e comprimido em toda a seção alongada por uma expansão do fluxo magnético que empurra. As dimensões do canal de propagação de plasma são selecionados, de tal modo que para uma indutância selecionado da seção alongada e indutância selecionada antes da seção alongada, a corrente que flui na seção alongada na extremidade a jusante é menor do que na extremidade a montante da seção alongada e uma pressão no toro plasma é

maior na extremidade de jusante da seção alongada do que na extremidade a montante da seção alongada. A seção alongada pode ser configurada para ter uma taxa de compressão radial de toro no plasma compreendida entre 1 e 2.

[006] O canal de propagação de plasma pode ainda compreender uma seção funil de elevada compressão entre a entrada e a extremidade a montante da seção alongada. A seção de funil compreende uma extremidade a montante em comunicação fluídica com a entrada e uma extremidade a jusante em comunicação fluídica com a extremidade a montante da seção alongada. Um espaço anular de seção transversal na seção funil definida como uma distância radial entre os eletrodos interno e externo diminui em direção a jusante ao longo do comprimento da seção de funil. Além disso, a seção de funil pode ser configurada para ter uma taxa de compressão radial de entre 3 e 10.

[007] A seção alongada pode ter uma razão fixa de eletrodo interior e raios de eletrodos exteriores. O raio $r(z)$ de um dos eletrodos internos ou externos ao longo de uma posição z no sentido do comprimento da seção alongada pode ser definida pela equação:

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

em que z_0 é uma posição longo do comprimento da seção

alongada na extremidade a montante, c é uma razão de indutância por unidade de comprimento L' da seção alongada para a indutância L_0 antes da seção alongada, e a e b são constantes definidas por:

$$[008] \quad a = b + 1 / r_0$$

[009] em que r_0 é o raio do eletrodo interno ou externo na extremidade a montante, e

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

em que r_1 e z_1 são o respectivo raio do eletrodo interno ou externo e a posição longitudinal da seção alongada na extremidade a jusante.

[0010] Alternativamente, os raios dos eletrodos interiores e exteriores não estão em uma proporção fixa em relação ao outro. Em tais casos, o raio $r(z)$ de cada um dos eletrodos interior e exterior ao longo de uma posição z no sentido do comprimento da seção alongada é definido separadamente pela equação:

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

em que, z_0 é uma posição ao longo do comprimento da seção alongada na extremidade a montante, c é a razão entre indutância por unidade de comprimento L' da seção alongada para a indutância L_0 antes da seção alongada, e a e b são

constantes definidas por:

$$a = b + 1 / r_0$$

em que r_0 é o raio do eletrodo interno ou externo na extremidade a montante, e

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

em que, r_1 e z_1 são o respectivo raio do eletrodo interno ou externo e a posição longitudinal da seção alongada na extremidade a jusante.

[0011] A fonte de energia pode ser configurada para gerar um impulso elétrico de aceleração, uma vez que impede o toro de plasma a entrar na seção alongada. A fonte de alimentação também pode ser configurada para gerar um impulso elétrico com uma aceleração de tempo, duração e amplitude da corrente que resulta em um fluxo constante de empuxo, quando o toro de plasma desloca ao longo da seção alongada.

[0012] De acordo com um outro aspecto, é proporcionado um sistema que compreende a aceleração de plasma e um dispositivo de compressão, tal como definido acima, e um gerador de plasma compreendendo um eletrodo tubular exterior e um eletrodo interior tubular que se estende no interior do eletrodo exterior para definir entre eles um canal anelar de formação de plasma. O eletrodo

exterior do acelerador está fisicamente ligado ao eletrodo exterior do gerador de plasma, e o canal anelar de formação de plasma está alinhado e em comunicação fluida com o canal anelar de propagação de plasma. O sistema pode ainda compreender uma região de relaxamento de toro de toro definida por uma parede interior do eletrodo exterior e um espaço entre a extremidade a montante do eletrodo interior acelerador e uma extremidade de jusante do eletrodo interno gerador de plasma. A região de relaxamento está em comunicação fluídica com o canal de formação do plasma e o canal de propagação de plasma. A região de relaxamento pode compreender uma zona de expansão para dentro, formada na extremidade a montante do eletrodo interior acelerador. Em alternativa, a região de relaxamento pode compreender uma zona de expansão para o exterior, formada na extremidade a montante do acelerador no eletrodo exterior.

Breve Descrição dos Desenhos

[0013] Tamanhos e posições relativas dos elementos nos desenhos não são necessariamente em escala. Por exemplo, as formas de vários elementos e ângulos não são desenhados à escala, e alguns destes elementos estão arbitrariamente ampliados e posicionados para melhorar a legibilidade do desenho.

[0014] A FIG.1A (ESTADO DA TÉCNICA) são gráficos de uma concretização simulada de um sistema conhecido de

aceleração de plasma e compressão tendo um canal de propagação de plasma com uma geometria cônica constante. Um gráfico superior mostra a geometria (raio vs comprimento axial) de um canal anelar propagação de plasma que se prolonga axialmente do acelerador, em que a curva superior mostra a geometria de um eletrodo exterior e a curva inferior mostra a geometria de um eletrodo interno. Um gráfico inferior mostra um balanço atual I_{bal} (curva cheia) e um limiar de corrente I (curva ponto tracejado) ao longo do comprimento do canal de propagação de plasma no acelerador.

[0015] A FIG. 1B (ESTADO DA TÉCNICA) é um gráfico de uma corrente de empuxo (em Mega Amperes, MA) como uma função de λ (estado mais baixo de energia) de um toro de plasma ao longo do comprimento do canal anelar do acelerador da FIG. 1A, em que a linha sólida representa a corrente de equilíbrio e a linha tracejada representa a corrente de limiar.

[0016] A FIG. 2 é uma vista em corte longitudinal esquemática de uma concretização não limitativa de um sistema de aceleração e compressão de plasma que compreende uma fonte de energia, um gerador de plasma, um acelerador com um canal de propagação de plasma anelar que compreende uma seção alongada que tem um intervalo anular não-linear decrescente e uma região de relaxamento com uma zona de expansão para o interior.

[0017] A FIG. 3 A é um gráfico das voltagens

exemplificativas (em kV) aplicadas pela fonte de energia para o gerador de plasma e um acelerador da FIG. 2, em que a linha a cheio mostra uma voltagem de formação de um impulso de plasma aplicado a uma região de formação no gerador de plasma, e uma linha tracejada que mostra uma voltagem do impulso de aceleração aplicado ao acelerador, como uma função de tempo (em μ s).

[0018] A FIG. 3B é um gráfico que mostra uma corrente (em MA) aplicado ao gerador de plasma (linha sólida) e um acelerador (linha tracejada) mostrado na Figura 3A.

[0019] A FIG. 4A é uma vista em corte longitudinal esquemática de uma geometria adequada do canal de propagação de plasma do acelerador da FIG. 2.

[0020] A FIG. 4B é um gráfico de um limiar de corrente, o equilíbrio de corrente, dinâmica da corrente como uma função da posição no sentido do comprimento axial, no acelerador, mostrado na FIG. 4A, em que a curva cheia representa o saldo atual I_{bal} , a curva tracejada representa o ponto-limite da corrente I_m e a curva tracejada representa a corrente dinâmica.

[0021] A FIG. 5 é um gráfico de um limiar de corrente, o equilíbrio de corrente, corrente dinâmica como uma função de λ (estado mais baixo de energia) de um toro de plasma no acelerador mostrado na FIG. 4A, em que a curva cheia representa o equilíbrio de corrente, a curva de ponto

tracejado representa a limiar da corrente e a curva tracejada representa a corrente dinâmica.

[0022] A FIG. 6A é uma vista em corte longitudinal de contornos de um fluxo poloidais simulado em $t = 62 \mu s$ no acelerador mostrado na FIG. 4A.

[0023] A FIG. 6B é uma vista em corte longitudinal de contornos de um fluxo poloidais simulado em $t = 70 \mu s$ no acelerador mostrado na FIG. 4A.

[0024] A FIG. 7 é uma vista em corte longitudinal de contornos de um fluxo poloidal simulada do acelerador tendo um perfil geométrico, de acordo com uma outra concretização.

[0025] A FIG. 8 é uma vista em corte longitudinal esquemática de outra concretização não limitativa de um sistema de aceleração e compressão do plasma contendo uma fonte de energia, um gerador de plasma, e um acelerador com um canal de propagação de plasma anelar que compreende uma seção alongada que tem um não-linear decrescente fenda anelar e nenhuma região relaxamento.

[0026] A FIG. 9A é uma vista em corte longitudinal de contornos de um fluxo poloidais em $t = 35 \mu s$ em uma operação simulada do acelerador mostrado na FIG. 8.

[0027] A FIG. 9B são gráficos das voltagens exemplificativas (em kV) e correntes (em MA) aplicadas pela fonte de energia para o gerador de plasma e um acelerador da FIG. 8, em que a curva cheia mostra uma voltagem (gráfico

superior) e uma corrente (gráfico de baixo) de impulsos de formação de plasma aplicado a uma região de formação do gerador de plasma e as curvas tracejadas mostram uma voltagem (gráfico superior) e uma corrente (inferior gráfico) do pulso de aceleração aplicado ao acelerador, como funções do tempo (em μ s).

Descrição Detalhada da Invenção

[0028] Um exemplo de um sistema conhecido de compressão e aceleração do plasma é uma arma Marshal magnetizada em duas fases. Na primeira fase, o toro de plasma pode ser formado por descarga de uma bateria de condensadores através de um par de eletrodos coaxiais, com um campo magnético radial proporcionando a magnetização inicial do plasma. Na segunda fase, uma bateria de condensadores é descarregada em um acelerador de cone coaxial com o toro de plasma como uma armadura, em que o acelerador tem um par de eletrodos interior e exterior tubular coaxialmente alinhados, que definem um canal anular com uma geometria cônica constante, isto é, o canal tem um intervalo anular (distância entre os raios dos eletrodos interno e externo) que diminui linearmente ao longo do comprimento do canal. A corrente J interage com o campo magnético B gerado pela corrente e a força magnética (Lorentz) $J \times B$ acelera e comprime o toro plasma para baixo do canal anular de aceleração.

[0029] Outro exemplo de um sistema de aceleração e

compressão conhecido é um sistema RACE (Ring Accelerator Experimental, do Lawrence Livermore National Laboratory), que utiliza a geometria da arma, onde uma região de aceleração cilíndrica coaxial com um longo intervalo anular constante (sem compressão) é seguido por um convergente, concentrando seção com uma geometria cônica constante no plasma que é comprimida. Na maioria das aplicações desta classe de dispositivo, a energia cinética final do toro de plasma é rapidamente despejada em um impulso de radiação conforme o toro plasma é colocado em descanso em uma região de impacto final.

[0030] Outro exemplo de um sistema de aceleração e compressão conhecido é um sistema MARAUDER (Magnetically Accelerated Rings to Achieve Ultrahigh Directed Energy and Radiation, da Air Force Phillips Laboratory em Albuquerque, Novo México). O dispositivo MARAUDER compreende um cone de pré-compressão com uma geometria cônica constante seguida por um longo intervalo constante de acelerador.

[0031] Em certos sistemas, em que o plasma pode ser acelerado e simultaneamente comprimido usando um acelerador coaxial com um canal anelar com uma geometria cônica constante, um impulso de aceleração aplicado ao acelerador a partir de uma fonte de alimentação deve ser configurado para produzir uma corrente de empuxo ao acelerador que aumenta ao longo do comprimento do canal e é mais elevado quando o toro

de plasma alcança a extremidade a jusante do acelerador de plasma, uma vez que para empurrar e compactar o toro de plasma através de uma fenda anular linearmente decrescente do canal, a corrente de empuxo deve ultrapassar uma pressão crescente magnética o toro (uma força inversa). Quando o toro de plasma deixa o acelerador e entra em uma câmara de conservação de fluxo (por exemplo, uma câmara-alvo), uma quantidade significativa de corrente pode permanecer em circulação no acelerador. Experiências com certos protótipos de um acelerador de plasma, que são sob a construção da General Fusion, Inc. (Burnaby, Canada) indicaram que esta corrente de circulação podem influenciar o tempo de vida do toro de plasma na câmara-alvo. Algumas frações desta corrente circulante pode fluir em linhas de campo abertas que podem ser executados através do centro do toro de plasma. O afluxo de energia magnética do acelerador dentro da câmara alvo pode normalmente ser acompanhado por um fluxo de partículas de plasma relativamente frio, que atuam para resfriar o toro de plasma relativamente quente. A dinâmica dessa interação entre a corrente ligada e o toro plasma foi descrito por R.C. Duck et. al., "Structure of the $n = 1$ mode responsible for relaxation and current drive during sustainment of the SPHEX spheromak", Plasma Phys. Control. Fusion, vol. 39; 715 - 736, pp., Maio de 1997.

[0032] As experiências na General Fusion Inc. têm

ainda mostrado que pode ser difícil, em alguns casos, remover um fluxo magnético que empurra, uma vez que tenha sido injetado no acelerador de plasma. Sabe-se que a voltagem aplicada é uma taxa de variação de um fluxo magnético total do acelerador; contudo, a aplicação de uma voltagem inversa não inverte o fluxo do influxo e tem-se observado que um fluxo negativo não pode imediatamente cancelar o fluxo positivo. Em vez disso, uma folha de corrente pode formar-se no plasma interno, resultando em regiões separadas de fluxo positivo e negativo. Como resultado, um fluxo líquido é diminuído; no entanto, a corrente de empuxo realmente aumenta.

[0033] Por conseguinte, é desejável proporcionar um sistema e / ou método para o funcionamento do sistema que comprime e acelera um toro de plasma a partir de um acelerador com uma quantidade reduzida de corrente de empuxo na extremidade de saída do acelerador e, particularmente, com uma corrente de empuxo que é menor na extremidade de saída que na extremidade de entrada do acelerador.

[0034] Antes de discutir concretizações específicas de tais sistemas e / ou métodos mais aperfeiçoados, é útil considerar os seguintes princípios que regem a compressão e aceleração de um toro de plasma. Um modelo simples de compressão em um acelerador é baseado na aproximação de que a energia do toro de plasma apresenta um comportamento

semelhante ao de um estado de Taylor. Um estado Taylor é uma configuração de plasma de força livre com

$$\nabla \times \underline{B} = \lambda \underline{B} \quad (1)$$

em que \underline{B} é um campo magnético da toro do plasma e λ é um valor próprio, que descreve o toro de plasma no seu estado de energia mais baixo. Em um caso de um toro de plasma que é acelerada em uma arma deslizante coaxial, λ é uma função de posição z do comprimento do toro de plasma em um canal de propagação de plasma da arma deslizante.

[0035] A energia U do estado Taylor é

$$U = \frac{K\lambda}{2\mu_0} \quad (2)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética de um vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ N / A²) e K é uma helicidade magnética do toro de plasma, onde K é dado pela

$$K \equiv \frac{1}{2} \nabla \cdot \underline{A} \cdot \underline{B} \quad (3)$$

onde \underline{A} é um vetor potencial magnético que está em função da posição do toro no plasma e V é o volume de toro do plasma.

[0036] A partir do estado de Taylor, pode ser assumido que a energia do toro de plasma é proporcional à λ para um toro de plasma na posição z :

$$U \propto \lambda(z) \quad (4)$$

$\lambda = \frac{\pi}{\Delta r(z)}$
 onde λ é a helicidade do toro de plasma é uma
 quantidade conservada.

[0037] Para um acelerador coaxial tendo um canal de propagação de plasma anular definido por um par de eletrodos tubulares coaxialmente alinhados, ou seja, um eletrodo externo com um raio externo $r_{externo}$ e um eletrodo interno tendo um raio interior $r_{interno}$, a alteração no intervalo anular Δr no canal anular de propagação como uma função da posição axial z ao longo do canal de propagação de plasma pode ser definida como $\Delta r(z) = r_{externo} - r_{interno}$. Uma força que equilibra o toro de plasma a uma dada posição longitudinal axial no canal é proporcional à $d\lambda / dz$, onde $\lambda(z)$ é um valor próprio, que descreve o toro de plasma quando se está em posição z axial longitudinal do canal.

[0038] Quando uma fonte de energia eletricamente acoplada ao acelerador aplica um impulso elétrico para o acelerador, empurrando uma corrente que flui através dos eletrodos do acelerador, a saber, através de um dos eletrodos, através da abertura anular através do toro de plasma, em frente do outro eletrodo e volta à fonte de energia. Uma força de pressão aplicada necessária para conduzir o toro de plasma para baixo do acelerador ($F_{impulso}$) pode ser determinada através da integração de uma pressão magnética devido ao (a montante) do lado corrente empurrando através da parte de trás do toro de plasma e pode ser

expressa pela equação:

$$F_{push} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(z)}{dz} \quad (5)$$

onde I é a corrente de empurrar (na parte de trás do toro) e $L(z)$ é uma indutância do circuito de corrente empurrando (o circuito de corrente ao longo dos eletrodos e através da abertura) quando toro de plasma está em uma posição z no sentido do comprimento ao longo da canal. A indutância por unidade de comprimento $L' \equiv dL(z) / dz$ do canal é, assim, dada por:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{outer}}{r_{inner}} \quad (6)$$

para um acelerador coaxial com um raio externo $r_{externo}$ e um raio $r_{interno}$ que para uma geometria cônica são funções da posição z do toro de plasma. "Geometria Taper" refere-se a um acelerador de coaxial tendo um canal de propagação de plasma anelar com uma fenda anelar que diminui em direção a jusante ao longo do comprimento do canal. Para um canal de propagação de plasma anelar que tem uma relação constante de raio externo $r_{externo}$ para o raio $r_{interno}$, o comprimento L' indutância por unidade é uma constante.

[0039] Para mover o toro de plasma para a frente, a força de empurrar deve superar uma força inversa exercida sobre o toro de plasma pelas paredes de afilamento do canal

de propagação plasma acelerador. O valor da força de sentido inverso pode ser encontrado a partir de um princípio de trabalho virtual definido como:

$$F_{\text{wall}}(z) = -\frac{dU(z)}{dz} \quad (7)$$

[0040] A força $F_{\text{parede}}(z)$ é proporcional à $\alpha \lambda / dz$, uma vez que foi assumido que a energia do toro plasma é

$$U = \frac{K\lambda}{2\mu_0} \quad \text{com uma constante } K.$$

[0041] Uma corrente de equilíbrio I_{bal} é definida como uma corrente no acelerador que produz uma força F_{empurra} que é igual à força F inversa, tal que a força resultante seja zero ($F_{\text{empurra}} + F_{\text{parede}} = 0$) e é dado pela

$$I_{\text{bal}}(z) = \frac{1}{\mu_0} \sqrt{\frac{2\pi K}{\ln\left(\frac{r_{\text{outer}}}{r_{\text{inner}}}\right)} \frac{d\lambda}{dz}} \quad (8)$$

[0042] Assim, para um toro de plasma para ser acelerado para a frente para baixo do canal de propagação de plasma do acelerador, a corrente aplicada a partir do pulso de aceleração deve ser maior do que a corrente de equilíbrio ($I > I_{\text{bal}}$).

[0043] Além disso, a fonte de energia pode ser configurada com os parâmetros para produzir um impulso de aceleração que reduz a probabilidade de ou evita um efeito de "soprar-por" no canal de propagação de plasma. Uma fuga de

gás pode ocorrer quando a pressão da corrente magnética empurrando levanta o toro de plasma a partir do eletrodo interior, permitindo o fluxo para expandir para frente do toro. Este efeito é chamado de "sopro estática" e é diferente de um sopro Rayleigh-Taylor que podem ocorrer quando se tenta dar o toro de plasma uma aceleração muito alta. Quando o toro plasma não é acelerando, este será levantado a partir do

$$\frac{B_{push}^2}{2\mu_0} > \frac{B_{max}^2}{2\mu_0}$$

eletrodo interno se,

onde $B_{empurrar}$ é um campo magnético da corrente empurrando o condutor interno (eletrodo interior de um acelerador) e B_{max} é um campo magnético máximo do toro de plasma no condutor interno.

[0044] $B_{empurrar}$ é uma função de um raio do eletrodo interno que está em função da posição z no sentido do comprimento do toro de plasma e no canal de corrente aplicada.

$$B_{push(z)} = \frac{\mu_0}{2\pi r_{inner}(z)} I \quad (9)$$

[0045] Um campo magnético máximo do toro de plasma no eletrodo interno é dada

$$B_{max}(r_{inner}) = \frac{\psi}{\mu_0(\bar{r}^2 - r_{inner}^2)} \quad (10)$$

onde ψ é um fluxo poloidal do toro de plasma e $\bar{r} = \frac{(r_{outer} + r_{inner})}{2}$.

O campo de empurrar está em um máximo no condutor interno e é dada por $2\pi r_{inner} B_{push} = \mu_0 I$, e, assim, uma corrente de limiar de sopro é $I_{lift} = 2\pi r_{inner} B_{push} / \mu_0$. Um limiar de corrente para a fuga de gás 1 é definido como a corrente quando $B_{empurrar} = B_{max}$ e é definido como

$$I_{lift} = \frac{2\pi \psi r_{inner}}{\mu_0^2 (\bar{r}^2 - r_{inner}^2)} \quad (11)$$

[0046] Por isso, em um caso estático, para reduzir o risco de ou evitar fuga de gás, a corrente de empurrar deve ser menor do que a corrente limiar ($I < I_{elevação}$).

[0047] Uma parcela superior mostrada na FIG. 1A (estado da técnica) mostra um exemplo conhecido de um sistema de aceleração e de compressão de plasma que tem um canal de propagação de plasma com uma geometria cônica constante (isto é, um canal que tem uma fenda anelar que diminui linearmente em uma direção a jusante ao longo do comprimento do canal); a curva superior neste gráfico mostra a geometria de um eletrodo exterior e a curva inferior mostra a geometria de um eletrodo interno. Uma parcela inferior mostrada na FIG. 1A ilustra um exemplo de fluxo de corrente no sistema da FIG. 1A, e, mais particularmente, mostra um balanço atual J no acelerador (curva cheia) como uma função da posição no

sentido do comprimento axial do toro no canal de propagação de plasma, e um limiar de corrente para sopro estático I_m do acelerador como uma função da posição axial longitudinal do toro de plasma no canal de propagação de plasma (curva de pontos tracejados). Como pode ser visto no sistema conhecido com uma geometria cônica constante, a corrente necessária para conduzir o toro de plasma para a frente está em um máximo quando o toro de plasma está na extremidade a jusante do sistema.

[0048] A FIG. 1B mostra um exemplo do balanço de corrente (curva cheia) e limiar de corrente (curva de ponto tracejado), como uma função de λ (em que $\lambda = 2\pi/\Delta r(z)$) do toro de plasma do acelerador mostrado na figura 1A. Como pode ser visto em um acelerador com uma geometria cônica constante, conforme o toro de plasma é acelerado para baixo do canal de propagação de plasma do acelerador, a corrente mínima necessária para empurrar o toro de plasma (I_{bai}) aumenta ao longo do comprimento do canal, de tal modo que a corrente empurrando é mais alta na extremidade a jusante do acelerador quando o toro de plasma está a uma compressão máxima (tem a sua maior λ).

[0049] Concretizações presentes de um sistema de compressão e aceleração de plasma são concebidos de modo que o toro de plasma possa chegar à saída do acelerador com uma relativamente pequena corrente empurrando-o para trás e com

um máximo de compressão do toro plasma. A corrente empurrando na saída do acelerador deve ser menor do que na entrada do acelerador, mas ainda proporcionar aceleração e compressão do toro de plasma ao longo do acelerador.

[0050] As concretizações de um sistema de compressão de plasma melhorado irão agora ser descritas com referência às figuras 2 a 9. Estas concretizações incluem um acelerador tendo eletrodos interiores e exteriores tubulares coaxialmente alinhados, que definem um canal de propagação de plasma anelar que compreende uma seção de compressão elevada e uma seção alongada de compressão ligeira a jusante da seção de compressão elevada e que tem uma geometria que reduz a quantidade de corrente necessária para completamente empurrar a aceleração e compressão de um toro de plasma através do acelerador. Mais em particular, o canal de propagação anelar na seção alongada tem uma fenda anelar transversal (definida como a distância radial entre os eletrodos interno e externo), o que diminui de forma não linear em direção a jusante ao longo do comprimento do canal. O sistema também inclui um gerador de plasma e uma fonte de energia acoplada eletricamente ao gerador de plasma e acelerador e que fornece um impulso elétrico de formação de plasma para o gerador de plasma e um impulso elétrico de aceleração para o acelerador. A fonte de energia é configurada para gerar um impulso de aceleração que vai empurrar o toro de plasma ao fim da seção

de compressão ligeiramente alongada de forma que a corrente empurra a uma extremidade a jusante da seção alongada é menor do que na extremidade a montante da seção alongada. Por exemplo, em algumas implementações, a fonte de energia é configurada, de modo que quando o toro de plasma entra na seção alongada nenhum fluxo de empuxo adicional é adicionado ao sistema, uma vez que a toro plasma passa um determinado ponto na seção alongada. Em outras implementações, a fonte de energia é configurada para gerar um impulso de aceleração que proporciona fluxo de empuxo adicional para completar a aceleração e compressão do toro de plasma, e este fluxo de empuxo pode ser, por exemplo, menos do que 5%, menos do que 10%, menos do que 15%, ou menos do que 25% do fluxo usado para empurrar inicialmente acelerar e comprimir o toro de plasma em várias implementações. O fluxo de empuxo adicional, se aplicado, pode ser utilizado para superar o arrasto em algumas de tais implementações.

[0051] Referindo-se agora à FIG. 2, e de acordo com uma concretização não limitativa, um sistema de aceleração e compressão de plasma 10 compreende um acelerador 100 com uma entrada 112 e uma saída 140 a jusante da entrada 112, e um canal de propagação de plasma anelar 118 que se estende entre a entrada 112 e a saída 140 do canal de propagação. O plasma 118 compreende uma seção funil de alta compressão 110 que tem uma extremidade a montante em comunicação fluídica com a

entrada 112 e uma ligeira compressão alongada 120 que tem uma seção 114a de extremidade a montante em comunicação fluídica com uma extremidade a jusante 114 da seção de funil 110 e uma extremidade a jusante em comunicação fluídica com a saída 140. A seção 110 tem um funil cônico, geometria de afilamento relativamente íngreme que se estende em uma direção a jusante a partir da entrada 112 e proporciona uma taxa relativamente elevada de compressão a um toro de plasma magnetizado 13 que o atravessa. Nesta concretização, a seção de funil 110 tem uma geometria cônica constante, isto é, tem um espaço anular que diminui linearmente para a jusante ao longo do comprimento da seção funil; no entanto, a seção de funil pode, alternativamente, ter uma geometria cônica variando. A seção alongada 120 é moldada para ter um afilamento relativamente suave do que a seção de funil 110. Na seção alongada 120 afunilamento é relativamente gradual, de modo que uma compressão relativamente pequena do toro de plasma é alcançado ao longo de um tempo relativamente longo a seção do acelerador 100 quando em comparação com a seção de funil 110. A seção alongada 120 é conformada para proporcionar uma transição gradual entre o afunilamento íngreme da seção de funil 110. A extremidade a montante 114a da seção alongada 120 pode ter uma geometria progressiva para reduzir o aquecimento não adiabática do toro de plasma que pode acontecer com uma transição mais afiada. Além disso, a seção

alongada 120 tem geometria de afunilamento variada, isto é, um espaço anular em seção transversal do canal na seção alongada 120 diminui de forma não linear em direção a jusante ao longo do comprimento da seção alongada 120. Esta geometria, para uma dada indutância da seção alongada e indutância antes da seção alongada ("pré-indutância"), faz com que uma corrente de empuxo a partir de um impulso de aceleração seja menor na saída 140 do que na entrada 114a da seção alongada 120.

[0052] O sistema 10 inclui ainda um gerador de plasma 12 e um sistema de conservação de fluxo 200 (por exemplo, uma câmara-alvo). O gerador 12 é configurado para gerar um plasma magnetizado toroidal 13 e inclui uma formação de eletrodo tubular 14, um eletrodo exterior coaxial 16a tubular interno e que envolve o eletrodo de formação interna 14 para definir um canal anular 17 entre elas e a formação de plasma.

[0053] O gerador 12 também comprehende uma série de bobinas magnéticas 18, que se estendem em torno do exterior do eletrodo exterior 16a. Um injetor de gás está em comunicação gasosa com o canal de formação de plasma anelar 17 e é operável para injetar uma quantidade exata de gás para dentro do canal 17 através de uma série de válvulas de sopro rápido 20 do injetor que se estendem em torno da câmara (somente dois dos quais são mostrado na FIG. 2). Cada uma das válvulas de sopro rápido 20 estão em comunicação fluídica com

um reservatório de gás 22, e podem ser operadas para proporcionar uma introdução de gás substancialmente simétrica para o gerador de plasma 12. O sistema 10 compreende ainda uma fonte de energia 24, que inclui, pelo menos, uma bateria de condensadores e, de preferência, dois ou mais bancos de condensadores, e pode ser operado para fornecer uma corrente para o gerador de plasma 12 e o acelerador 100. As bobinas 18 são configuradas para proporcionar um campo magnético para a formação de enchimento radial de campo poloidais do plasma. O sistema 10 pode ainda ser, pelo menos parcialmente evacuado por meio de um sistema de bombagem (não mostrado).

[0054] A forma do canal anelar de plasma 118 e a sua propagação e funil de secções alongadas 110, 120 são definidas por um eletrodo globalmente tubular interior 115 e o eletrodo exterior geralmente tubular 16b coaxial e que envolve o eletrodo interno 115. A extremidade a jusante do gerador 12 está ligada hidraulicamente à entrada de acelerador 112, isto é, com a extremidade a montante da seção de funil 110. A interface do gerador e do acelerador dos eletrodos exteriores 16a, 16b e a extremidade a jusante do gerador de plasma do eletrodo interior 14 e a extremidade a montante do acelerador do eletrodo interior 115 em conjunto, definem um volume aberto que serve como uma região de relaxamento 50 para a toro de plasma. No exemplo ilustrado na FIG. 2, o diâmetro do eletrodo interior do gerador é maior do

que o diâmetro do eletrodo interior do acelerador na entrada 112 criando, assim, uma zona de expansão para dentro da região de relaxamento 50. Quando o toro de plasma 13 formado no gerador 12 saírem do canal de formação 17 e entra na região de relaxamento 50, o toro expande-se ligeiramente e as linhas do campo magnético voltam a ligar, de modo que o toro de plasma possa estabilizar antes do banco de condensadores da fonte de alimentação 24 proporciona um impulso para o acelerador 100 para acelerar e comprimir o toro de plasma 13 a partir da entrada 112 do acelerador, a extensão do acelerador 100 e na direcção da saída do acelerador 140. Em alternativa, e como mostrado na FIG. 7, a região de relaxamento pode ser configurada com uma zona de expansão para o exterior, tal como será discutido em mais detalhes abaixo.

[0055] Como notado acima e como irá ser descrito em maior detalhe abaixo, o acelerador 100 é configurado para fornecer aceleração e compressão simultânea do toro de plasma 13, de modo que o toro de plasma chega à saída 140 com energia máxima (compressão máxima) e corrente de empuxo mínima por trás dele.

[0056] Em uma concretização, quando a fonte de alimentação 24 é acionada para fornecer um impulso de aceleração elétrica para o acelerador, uma corrente de empuxo flui da fonte de alimentação 24 para o eletrodo interior do

acelerador 115 ("eletrodo de aceleração"), através do intervalo anular entre os eletrodos 115 e 16b através do toro de plasma 13, e retorna para a fonte de alimentação 24, através do eletrodo exterior 16b, 16a. Esta corrente de empuxo gera um campo magnético azimutal, na região entre os eletrodos 115, 16b. Os atos de campo magnéticos sobre a corrente produzem uma forma de empuxo eletromagnética $J \times B$ (Lorentz), acelerando o toro de plasma 13 para baixo da seção funil cônica 110.

[0057] A corrente de impulso é selecionada para produzir uma força de impulsão que é maior do que uma força inversa (contrapressão) que é definida pela geometria do canal de propagação de plasma 118, de tal modo que o toro de plasma 13 irá acelerar a extensão do acelerador 100 e chegar a saída 140. Uma vez que o cone mais íngreme do canal de propagação de plasma está na seção funil 110, o mais elevado de contra-pressão existe nessa parte do acelerador 100; a fonte de alimentação 24 é, assim, configurado para gerar um impulso de aceleração que tem uma corrente de empuxo que gera uma força de pressão na seção funil 110 que é suficientemente alta para ultrapassar a contrapressão lá, bem como através da seção alongada 120. Uma vez que o grau de afunilamento do canal de propagação de plasma 118 cai significativamente na seção alongada 120, a fonte de alimentação 24 está configurada para produzir um máximo de corrente de empuxo I

crítico quando o toro de plasma 13 entra na seção alongada 120. Na extremidade a montante 114a da seção alongada 120 gerado um fluxo de empuxo Φ , o qual é definido pelo I crítica e uma indutância L_0 do sistema 10 antes da seção alongada 120 (na extremidade a montante 114a). Assim, o pico de corrente é empurrado na extremidade a jusante 114 da seção funil cônica 110 e a extremidade a montante 114a da seção alongada 120. Uma vez que o toro de plasma 13 entra na seção alongada 120 e começa a viajar ao longo da mesma, pouco ou nenhum adicional de fluxo de empuxo tem de ser injetado no acelerador. Uma vez que a fonte de alimentação 24 é descarregada, pode ser dissociada (curto-circuito por arco interno ou isoladores se tornar condutores) a partir do sistema 10 e a corrente pode fluir no sistema 10 em um ciclo.

[0058] A geometria do canal anelar de seção alongada 120 pode ser matematicamente definida com base nos seguintes princípios. Na seção alongada 120 do acelerador 100, o toro de plasma 13 é comprimido pela expansão do fluxo de empuxo. A corrente que flui em empurrar o acelerador 100 diminui quando o toro de plasma se aproxima da extremidade de saída 140 do acelerador 100 como um resultado do aumento da indutância na seção alongada 120. No entanto, a corrente de empurrar para trás o toro de plasma 13 deve ainda ser suficientemente grande para superar o aumento de contra-pressão (força inversa) devido à compressão do toro de plasma na seção

transversal anelar decrescente do canal de propagação de plasma 118.

[0059] Para acelerar o toro de plasma 13 com um fluxo de empuxo Φ ao mesmo tempo o toro de plasma 13 está em um equilíbrio de força, independentemente, da sua posição longitudinal z do canal de propagação de plasma 118, a função de λ (ζ) pode ser definida como uma função linear de

$$\frac{d\lambda}{dz} \propto \frac{dL^{-1}}{dz} \quad (12)$$

[0060] A condição de linearidade permite o total de energia $K\lambda(z)/2\mu_0 + \Phi^2/2L(z)$ seja independente da posição (z) do toro de plasma para algum valor de helicidade $K = K_0$. K_0 é um valor crítico da helicidade e pode distinguir entre um toro de plasma em repouso que será acelerado para a frente, se $K < K_0$ e um toro de plasma que será acelerada para trás, se $K > K_0$.

[0061] Ao definir a corrente aplicada $I(z)$ a uma posição de canal longitudinal z como $I(z) = \Phi / L(z)$, onde Φ é o fluxo de empuxo para trás do toro de plasma e L é a indutância da seção alongada 120 da um canal 18, uma expressão matemática define a forma (curva) da seção alongada 120 pode ser derivada que permite a toro de plasma 13 a ser acelerado e comprimido por todo o caminho para a extremidade de jusante da seção alongada (na saída 140) sem adição de qualquer ou muito pouco fluxo adicional para o acelerador

100.

[0062] Quando uma indutância por unidade de comprimento L do eletrodo de aceleração na seção 120 é constante (isto é, independente da posição longitudinal do canal z), a indutância do acelerador 100 é dada pela

$$L(z) = L_0 + (z - z_0)L' \quad (13)$$

onde L_0 é a indutância (pré-indutância) do circuito de corrente de empuxo antes da seção alongada 120 (quando o toro de plasma está na primeira extremidade 114a da seção alongada 120). L_0 pode incluir a indutância da seção funil cônica anterior 110 e qualquer indutância adicional que deve ser incluída como parte do ciclo atual de empuxo antes da seção alongada 120.

[0063] Nos casos em que a relação do raio do eletrodo interno r_{interior} e externo r_{externo} do acelerador 100 é constante, a indutância por unidade de comprimento L' na seção alongada 120 também é constante, e o toro de plasma entrando na seção 120 pode mover para a saída 140 do acelerador 100 com um fluxo de empuxo constante $\Phi = I(z)L(z)$. A forma da seção alongada 120 pode ser determinada pelo raio, quer do eletrodo interno ou externo 115, 16b, 114a na extremidade de montante (r_0, z_0) da seção alongada 120, um raio dos eletrodos interior e exterior 115, 16b na saída 140 (r_1, z_1), a indutância por unidade de comprimento L' de seção

alongada 120 e pela indutância L_0 antes da seção alongada 120, e é definido pela seguinte equação matemática:

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1+c(z-z_0)} \quad (14)$$

em que $c = L'/L_0$, $r(z)$ é tanto o raio do eletrodo exterior quanto interior em uma posição longitudinalmente axial ao longo da seção alongada 120, z_0 é uma posição axial da seção alongada 120 na extremidade a montante 114a da seção alongada 120, e a e b são constantes que podem ser determinados por resolvendo a equação 14, a montante e a jusante termina = z_0 e $z = z_1$ (em que r_0 e r_1 nas seguintes equações denotam o raio do eletrodo interno ou externo nas extremidades a montante e a jusante, respectivamente):

$$\frac{1}{r_0} = a - b; \quad a = b + \frac{1}{r_0}; \quad b = a - \frac{1}{r_0} \quad (15)$$

$$\frac{1}{r_1} = b + \frac{1}{r_0} - \frac{b}{1+c(z_1-z_0)} \quad (16)$$

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0} = b \left[1 - \frac{1}{1+c(z_1-z_0)} \right] \Rightarrow b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1+c(z_1-z_0)}} \quad (17)$$

[0064] Possíveis configurações geométricas diferentes da seção alongada 120 do acelerador pode ser calculada usando

as equações 14 - 17 e o software versátil Código Advecção magneto-hidrodinâmico de simulação (VCA; disponível a partir da Universidade de Michigan). Por exemplo, o sistema 10 pode ser selecionado para ter uma geometria de seção alongada que tem uma relação constante entre o raio do eletrodo exterior ao raio do eletrodo interno com os seguintes parâmetros: um raio do eletrodo exterior 16 na entrada 112 para ser de cerca de 1m, na junção 114 / 114a (ou seja, na junção entre a extremidade de jusante da seção funil 110 e a extremidade a montante da seção alongada 120) ser de cerca de 0,3 m; e na saída 140 de cerca de 0,2m; um raio do eletrodo de aceleração (interior) 115 na entrada 112 para ser 0.5mat sobre a junção 114 / 114a para ser de cerca de 0,15 m, e na saída 140 para ser de cerca de 0,1 m; o comprimento da seção funil cônico 110 para ser de cerca de 1,5 m; e o comprimento da seção alongada 120 para ser de cerca de 2,5 m. A indutância calculada por unidade de comprimento L' na seção 120 (para determinados parâmetros) é de cerca de = 128 nH / m, enquanto o pré-indutância L_0 calculada é de cerca de 200nH. Em uma simulação do sistema 10, com os referidos parâmetros de uma pré-indutância parasitária é de cerca de 50nH, enquanto a sua pré-indutância (indutância antes da seção alongada) é 151nH, o que significa que a pré-indutância total do sistema é de cerca de 10 simulada e 201nH é ligeiramente maior do que a pré-indutância calculada. Com base nos parâmetros acima

mencionados, descobrimos que uma curva de variação de afunilamento da seção alongada 120 pode ser definida a partir da equação (14) para $a = 11.1045m^{-1}$, $b = 4.2174m^{-1}$ e $c = 0,64m^{-1}$, a fim de que o toro de plasma para ser acelerado e comprimida por todo o caminho para a saída 140 e a corrente de empuxo na saída 140 para ser menor do que a corrente de empuxo na primeira extremidade 114a da seção alongada 120. O sistema com os parâmetros mencionados pode, por exemplo, acelerar e comprimir um toro de plasma com os seguintes parâmetros: massa do toro plasma de cerca de 10^{-6} kg (por exemplo, um plasma deuteron com 3×10^{20} íons por metro cúbico); fluxo poloidal do toro de plasma sobre 0.18Wb; um fluxo toroidal sobre 0.0324Wb e helicidade 0.0117Wb². As dimensões e parâmetros do acelerador e do toro de plasma acima mencionados são apenas para fins ilustrativos e sistema com dimensões / parâmetros diferentes podem ser concebidos para acelerar eficientemente e comprimir várias configurações de toro de plasma, de modo que a corrente de empuxo na extremidade do acelerador seja acentuada, enquanto a energia do plasma seja máxima (compressão máxima do toro de plasma).

[0065] Em uma outra concretização, a indutância na seção alongada 120 varia ao longo do seu comprimento no caso da geometria de tanto o eletrodo exterior 16 e o eletrodo de aceleração 115 (ao longo da seção alongada 120), que é determinado separadamente usando equações 14 - 17 por

resolver para o raio do eletrodo interno e os eletrodos exteriores $r_i(z)$ e $r_o(z)$ ao longo de cada posição longitudinal ao longo da seção alongada 120.

[0066] A fonte de alimentação 24 é configurada para gerar um impulso de formação de plasma para o gerador de plasma que gera um toro de plasma nele, e um impulso de aceleração elétrica ao acelerador 100, que gera uma corrente de empuxo e empurrando um fluxo neste que empurra o toro do plasma através do acelerador 100 a partir da entrada 112 até à saída 140. As FIGS. 3A e 3B mostram a voltagem e perfis de correntes de impulsos apropriados de formação (linhas sólidas) e impulsos de aceleração (linhas tracejadas). Em particular, a FIG. 3A ilustra um exemplo de uma voltagem aplicada pela fonte de energia 24 para o gerador de plasma 12 (curva a cheio) e o acelerador 100 (curva a tracejado) em função do tempo. Como pode ser visto nestas Figuras, o impulso tem uma voltagem de aceleração de cerca de 16kV, uma duração de cerca de $20\mu s$, e está programado para aplicar o pulso quando o toro de plasma está na região de relaxamento 50 para a entrada de 112 (cerca de $50\mu\beta$) e no final quando o toro 13 de plasma entra na seção alongada (cerca de $70\mu s$). A FIG. 3B ilustra um exemplo de uma corrente aplicada pela fonte de energia 24 para o gerador de plasma 12 (curva cheia) e para o acelerador, 100 (curva tracejada) em função do tempo. Durante o pulso de aceleração (em um momento de $50\mu s <$

$t < 70\mu s$), como as rampas atuais até para o seu nível máximo I crítica, o toro plasma 13 começa a se mover para baixo da seção funil cônica 110, em que o toro de plasma 13 é comprimido. Assim, o toro de plasma 13 é comprimida até certo ponto, o aumento da pressão do campo magnético do plasma e, portanto, impedindo o campo magnético de elevação empurra o toro de plasma 13 para fora do eletrodo interno 115 (prevenção de sopro ocorra). O impulso de aceleração é configurado para fornecer uma corrente de empuxo que é suficientemente elevada para contrariar a força inversa, enquanto continua a empurrar sobre o toro de plasma 13 todo o caminho até o inicio da seção alongada 120. O pico de corrente é na junção 114 / 114a do funil e secções alongadas 110, 120, e não no final do acelerador (extremidade de saída 140) como em aceleradores de plasma anteriores que tem uma geometria de conicidade constante (ver FIG. 1A). Uma vez que o toro de plasma 13 chega à seção alongada 120 e começa a viajar ao longo dela, nenhum fluxo adicional tem de ser injetado no acelerador 100 nesta concretização. A seção alongada 120 pode ser moldada, de modo a fornecer compressão mais suave do toro de plasma 13 através de uma seção mais alongada 120. À medida que o toro de plasma 13 se move a jusante, através da seção alongada 120, a indutância (L) na seção alongada aumenta, de modo que a corrente de empuxo (I) irá diminuir. O pico da corrente como ilustrado na FIG. 3B

pode ser de cerca de 1,44 MA, enquanto que a corrente que flui que empurra para trás o toro do plasma no final da seção alongada 120 (na saída 140) foi diminuído para cerca de 0,5 MA, devido ao aumento da indutância na seção alongada 120. Por conseguinte, nesta concretização, a corrente de empuxo é mais elevada quando o toro de plasma 13 está a jusante 114 da seção de compressão funil cônica 110 do acelerador 100.

[0067] A requerente tem utilizado modelagem MHD (magneto hidrodinâmica) utilizando o código VCA para avaliar um desempenho de diferentes modelos do sistema de aceleração e compressão de plasma 10 e, especificamente, diferentes geometrias da seção funil cônica 110 e a seção alongada 120 para prever a eficácia do acelerador 100 para acelerar e comprimir o toro de plasma 13 a uma condição de alta energia. A FIGO. 4A ilustra um exemplo de uma operação simulada do sistema de aceleração e compressão de plasma 10 da FIG. 2, mostrando a seção de compressão 110 e o funil de seção alongada 120 do acelerador 100. A linha vertical tracejada 500 na posição longitudinal do canal $z \sim 2.5m$ indica a junção 114 / 114a da seção funil 110 e a seção alongada 120. O comprimento da seção funil 110 foi fixado em 1,5 m e o comprimento da seção alongada foi fixado em 2,5m.

[0068] A FIG. 4B mostra o limiar da corrente e um equilíbrio de corrente atual dinâmica do sistema simulado 10 da figura 4A, em que o balanço atual t_{bai} é mostrado como uma

curva continua, o limiar de corrente I_m de sopro estático para ocorrer é mostrado como um ponto de curva tracejado, e uma corrente dinâmica por trás do toro de plasma é apresentado como uma curva tracejada. Todas as correntes são apresentadas como funções da posição do toro de plasma ao longo do comprimento do canal de propagação de plasma. A curva de corrente dinâmica representa a corrente de empuxo desejada para ser produzida pela fonte de energia para empurrar o toro de plasma ao longo do acelerador. A FIG. 4B mostra apenas a curva dinâmica presente na seção alongada, enquanto a presente dinâmica antes da seção alongada (na seção funil) é omitida para maior clareza. A corrente dinâmica é concebida para ser menor do que a corrente limiar para evitar o sopro, e maior do que a corrente de equilíbrio para explicar várias perdas, tais como a perda de fluxo, o atrito, etc. Ao comparar a dinâmica (empurrando) atual mostrada na FIG. 4B com o (empurrando) corrente dinâmica mostrado na FIG. 1A (trama inferior) que pode ser notado que a corrente dinâmica na saída do sistema 10 é muito menor do que a corrente de empuxo na extremidade do acelerador com uma geometria cônica constante.

[0069] A FIG. 5 ilustra um exemplo do limiar, o balanço e dinâmicas das correntes em um sistema que tem os parâmetros mostrados na FIG. 4A como função de λ . Como pode ser visto, λ na junção 114 / 144a das secções alongadas de

funil e é de cerca de 24 m^{-1} e o balanço atual nesse ponto é no máximo de cerca de 1.2mA , enquanto que no final da seção alongada λ é aumentada significativamente a um valor máximo de cerca de 33 m^{-1} , enquanto o valor de balanço atual é de cerca de 0.4mA que é significativamente menor do que no final da seção funil 110. Esta figura ilustra que um toro de plasma comprimido máxima é empurrado para a saída 140 do acelerador 100 com um mínimo de corrente empurrando-o para trás.

[0070] As FIGS. 6A e 6B mostram uma operação simulada do sistema 10 tendo os parâmetros mostrados na FIG. 4A, e, em particular, mostra os contornos de fluxo poloidais no canal de propagação de plasma 118 em $t = 62\mu\text{s}$ (Fig. 6A) e a $t = 70\mu\text{s}$ (Fig. 6B). A FIG. 6A mostra o toro de plasma 13 a ser comprimido na seção funil 110 conforme sua frente atinge a extremidade a jusante da seção de funil 114. A FIG. 6B ilustra o toro de plasma 13, uma vez que entra na seção alongada 120. O toro de plasma 13 pode ser empurrado para baixo a seção de compressão funil 110 a cerca de $130 \text{ km} / \text{s}$ para a sua extremidade em $z = 2,5$ e, em seguida, o circuito de aceleração da fonte de alimentação 24 está definida para zero de voltagem quando o toro de plasma 13 entra na seção alongada em $30 \text{ km} / \text{s}$ no seu início em $z \sim 2.5\text{m}$. As simulações mostraram que o toro de plasma 13 pode chegar ao fim do sistema 10 (extremidade de saída 140) em $t \sim 90\mu\text{s}$ e velocidade de cerca de $18 \text{ km} / \text{s}$.

[0071] De acordo com uma outra concretização e com referência à FIG. 7, um sistema 10 é fornecido com uma região de relaxamento com uma zona de expansão para o exterior. A FIG. 7 mostra uma operação simulada do presente sistema 10 tendo uma seção funil com 2,5 m de comprimento e uma seção alongada com 4.5m de comprimento. Uma expansão para fora seguido por compressão interna pode utilizar um cone muito íngreme na seção de compressão funil 110, assim que esta configuração possa ser mais suscetível a ocorrência por sopro.

[0072] De acordo com ainda outra concretização e com referência à FIG. 8, um sistema de compressão e aceleração de plasma 1000 é fornecido com nenhuma região relaxamento. O sistema 1000 compreende um acelerador bi-seção 1100 e uma fonte de energia 1024. O sistema compreende ainda um gerador de plasma 1012 e uma região de conservação de fluxo 1200 (por exemplo, uma câmara-alvo). O gerador 1012 compreende um eletrodo tubular interior 1014 (formação) inserido dentro de um eletrodo exterior tubular 1016 para formar um canal de formação anelar de plasma nele entre o local onde uma quantidade exata de gás pode ser injetada. Uma vez que o gás tenha preenchido o canal de formação de plasma entre os eletrodos 1014 e 1016, a fonte de alimentação 1024 fornece um impulso de formação de plasma para o gerador de plasma, que inclui uma corrente alta entre os eletrodos que ioniza o gás

e podem **formar** um toro de plasma magnetizado 1013.

[0073] O acelerador 1100 inclui uma camada exterior (acelerando) 1015 eletrodo em que o eletrodo interno 1014 é inserido criando um canal de propagação de plasma anelar 1118 no seu interior entre, por meio do qual o toro de plasma 1.013 propaga para a câmara-alvo 1200. O acelerador 1100 compreende uma seção de compressão 1110 e um funil de seção alongada 1120 juscante de e em comunicação fluida com a seção de funil 1110. A seção de compressão funil 1110 é uma seção afunilada cónica e tem uma extremidade a montante em comunicação de fluidos com a entrada do acelerador de 1112, e uma extremidade a jusante 1114 em comunicação de fluidos com uma extremidade 1114a a montante da seção alongada 1120.

[0074] Na seção funil 1110, o afunilamento pode ser relativamente íngreme e pode proporcionar uma compressão radial do toro de plasma por um fator de cerca de 3 - 10. A seção alongada 1120 é maior do que a seção funil de 1110 com afilamento relativamente muito mais suave do que a seção funil cônica 1110, proporcionando, assim, uma taxa de compressão menor de corte longitudinal ao longo do tempo. Por exemplo, uma compressão radial do toro de plasma ao longo do comprimento da seção de 1120 pode ser por um fator de cerca de 1 - 2.

[0075] A seção alongada 1120 tem uma extremidade a montante 1114a que está ligado e em comunicação de fluido com

a extremidade a jusante 1114 da seção de funil 1110 e uma extremidade a jusante em comunicação de fluidos com a saída 1140 do acelerador 1100. Similar a concretização mostrada na FIG. 2, a seção alongada tem uma geometria variável cônica, ou seja, o espaço anelar do canal de propagação anelar 1118 na seção alongada 1120 diminui de forma não linear em direção a jusante ao longo do comprimento da seção alongada 1120. A seção alongada 1120 pode ser configurada para proporcionar uma transição relativamente gradual do afilamento mais inclinado da seção funil 1110 para a desabituação suave proporcionado ao longo do comprimento da seção de 1120. Por exemplo, a seção 1120 pode ser configurada, de modo a que a sua extremidade a montante compreende um grande raio de curvatura proporcionando uma alteração suave a partir da seção funil íngreme 1110.

[0076] O sistema 1000 compreende uma unidade de exterior, ou seja, a fonte de energia é eletricamente acoplada ao acelerador 1100, de tal modo que a corrente flui a partir da fonte de alimentação 1024 através do eletrodo externo 1015, através do intervalo anular através do toro do plasma, através do eletrodo interno 1014 depois de volta à fonte de energia. Uma vez que a fonte de alimentação 1024 é descarregada, pode ser dissociada (curto circuito) do sistema 1000 e a corrente pode fluir no sistema 1000 em um ciclo.

[0077] Ao contrário do sistema 10 mostrado na FIG. 2,

o sistema 1000 não compreendem uma região de relaxamento ou de qualquer outro tipo de região de expansão. A fonte de energia é configurada para gerar o impulso de aceleração como a plasma é ainda borbulhar para fora do gerador 1012, de modo a que um campo de voltagem de linha de fluxo de empuxo impulsiona restabelecimento das linhas magnéticas, cortando fora uma das linhas de campo distendidas, para formar o toro de plasma e, ao mesmo tempo empurrando o toro de plasma para baixo do acelerador 1100.

[0078] Em uma outra concretização, o sistema 1000 compreende uma unidade interior como do tipo mostrado no sistema da FIG. 2.

[0079] Referindo-se agora à FIG. 9A, uma operação simulada do sistema 1000 mostrado na FIG. 8 mostra os contornos do fluxo poloidais em $t = 35\mu s$. Como se pode notar, o fluxo empurrando acelera e comprime o toro plasma abaixo da seção de compressão funil 1110 do acelerador de 1100 em direção a sua extremidade a jusante 1114. Quando o pulso de aceleração da fonte de energia é descarregado, o toro de plasma entra na seção alongada 1120, onde é ainda mais acelerada e comprimido na direção da câmara-alvo 1200, sem o fluxo adicional sendo injetado no acelerador 1100.

[0080] Os perfis de voltagem e de corrente de um impulso de formação de plasma e um impulso de aceleração produzido pela fonte de energia está representado na fig. 9B.

O perfil de **voltagem** é mostrado na trama superior e o perfil de corrente é mostrada na trama inferior e a formação de impulsos de plasma é mostrado na linha cheia e o impulso de aceleração é mostrado na linha tracejado, ambos em função do tempo. Como pode ser visto nesta figura, o impulso de aceleração é acionado, enquanto a **voltagem / corrente** do impulso de formação de plasma não está ainda descarregado. A **voltagem** aplicada do pulso de aceleração no acelerador de 1100 é em torno de 1 LKV. Como o plasma formado no gerador de bolhas de 1,012 para fora do gerador, de modo a formar o toro de plasma, o impulso de aceleração é ativado, de modo que a corrente (empuxo) de aceleração pode conduzir a reconexão das linhas magnéticas, de modo a formar o toro de plasma imediatamente e acelerar o toro de plasma para baixo no acelerador. Como a corrente empurrando se acumula, o toro de plasma é comprimido para baixo à seção funil 1110 para a junção 1114 / 1114a do funil de secções alongadas 11 e 10, 1120, assim, quando o toro de plasma entra na seção alongada 1120 e começa a viajar ao longo da mesma, sem fluxo adicional tem de ser injetado. Na operação simulada, a corrente que flui em empurrar o acelerador quando o toro de plasma alcança a câmara-alvo 1200 diminuiu para cerca de 0,25 MA devido ao aumento da indutância na seção alongada 1120.

[0081] Embora certas implementações do acelerador têm sido descritas como incluindo duas secções, isto é apenas

para fins ilustrativos e não é uma limitação ou uma exigência; em particular, o acelerador dos sistemas 10, 1000 pode ser fornecido somente com uma única seção alongada que tem uma geometria variável de afilamento como definido na equação 14, em que o acelerador é fornecido com uma indutância suficiente e pré-indução para permitir uma aceleração-pulso para gerar um fluxo de empuxo que empurra o toro de plasma para a saída com uma corrente de empuxo que é menor na saída que na entrada da seção alongada. Alternativamente, outras concretizações pode compreender três, quatro, cinco, ou mais seções alongadas, em que pelo menos uma destas seções tem uma geometria variável de afilamento. Por exemplo, o afunilamento pode ser em algumas concretizações em forma de "trompete". Parâmetros de projeto relevantes (por exemplo, velas, raios interno / externo, comprimentos de seções, as correntes de empuxo, etc.) pode ser determinada em cada um desses implementação usando as técnicas de modelagem MHD aqui descritas.

[0082] O toro de plasma obtido em qualquer uma das concretizações divulgadas pode ser um plasma de alta energia e pode ser adequado para aplicações, tais como, por exemplo, fonte de raios-x para a produção de isótopos médicos, fonte de neutrões, radiação, dispositivos de fusão nuclear, etc. Concretizações dos sistemas e métodos acima descritos podem ser usados para comprimir um plasma, que compreende um

material fusionáveis. Por exemplo, os materiais fusionáveis pode compreender um ou mais isótopos dos elementos leves, tais como, por exemplo, deutério, tritio, hélio-3, 6-lítio, lítio-7, etc. Assim, certas concretizações do sistema podem estar configuradas e operadas para atuar como geradores de nêutrons ou fontes de nêutrons. Nêutrons, assim, produzidos têm uma ampla gama de usos práticos em pesquisa e em campos industriais. Por exemplo, uma fonte de nêutrons pode ser usada para a análise por ativação com nêutrons (NAA), que pode fornecer uma análise multi-elemento de maior, menor, traço, e elementos raros em uma variedade de substâncias (por exemplo, explosivos, drogas, materiais físseis, venenos, etc.) e podem ser usados em uma variedade de aplicações (por exemplo, a detecção de explosivos e identificação, monitoração ecológica do ambiente ou do lixo nuclear, etc.). Concretizações do sistema configurado como uma fonte de neutrões pode também ser utilizada para a investigação de materiais (por exemplo, analisando a estrutura, dinâmica, composição, e a uniformidade de materiais químicos), para o ensaio não destrutivo de objetos industriais (por exemplo, através de radiografia de neutrões e / ou tomografia de nêutrons), e para muitas outras aplicações industriais e tecnológicos. As concretizações dos sistemas e métodos para a compressão de plasma acima descritas são também apropriadas para aplicações ao estudo de plasma de alta densidade

energética, incluindo, por exemplo, aplicações em astrofísica e física nuclear.

[0083] Embora concretizações particulares de elementos, e aplicações da presente invenção tenham sido mostradas e descritas, será entendido, que o âmbito da revelação não está limitado a eles, uma vez que podem ser feitas modificações pelos peritos na arte sem se afastar do âmbito da a presente divulgação, em particular à luz dos ensinamentos anteriores. Assim, por exemplo, em qualquer método ou processo aqui divulgado, os actos ou operações tornando-se o método / processo pode ser realizado em qualquer sequência apropriada e não estão necessariamente limitados a qualquer sequência divulgada em particular. Elementos e componentes podem ser configurados ou dispostas de forma diferente, combinados, e / ou eliminado em várias formas de realização. As várias características e processos descritos acima podem ser utilizados independentemente um do outro, ou podem ser combinadas de várias maneiras. Todas as possíveis combinações e subcombinações são destinadas a cair dentro do âmbito desta divulgação. Referência ao longo desta descrição para "algumas formas de realização, uma forma de realização" "", ou outros semelhantes, significa que um determinado recurso, estrutura, passo, processo, ou característica descrita em ligação com a concretização está incluído em pelo menos uma concretização. Assim, as

aparências das frases "em algumas concretizações", "em uma concretização", ou semelhantes, em toda o presente relatório descritivo não são necessariamente referindo-se a todos a mesma concretização e pode referir-se a um ou mais dos mesmos ou diferentes concretizações. De fato, os novos métodos e sistemas aqui descritos podem ser incorporados em uma variedade de outras formas; além disso, várias omissões, substituições, adições, equivalentes, alterações e rearranjos, sob a forma de concretizações aqui descritas podem ser feitas sem afastamento do espírito das invenções aqui descritas.

[0084] Vários aspectos e vantagens das concretizações já foi descrita, quando apropriado. É para ser entendido que nem necessariamente todos esses aspectos ou vantagens podem ser alcançados de acordo com qualquer concretização particular. Assim, por exemplo, deve-se reconhecer que as várias concretizações podem ser realizadas de uma maneira que alcança ou otimiza uma vantagem ou grupo de vantagens, tal como aqui ensinado, sem necessariamente alcançar outros aspectos ou vantagens como pode ser ensinado ou sugerido aqui.

[0085] A linguagem condicional aqui utilizado, tais como, entre outros, "pode", "poderia", "talvez", "deve", "por exemplo," e similares, a menos que especificamente indicado de outra forma, ou de outra forma compreendida dentro do

contexto como usado, é em geral pretende transmitir que certas concretizações incluem, enquanto outras concretizações não incluem, certas características, elementos e / ou etapas. Assim, tal linguagem condicional não é geralmente a intenção de sugerir que as características, elementos e / ou etapas são de qualquer forma necessária para uma ou mais concretizações, ou que uma ou mais concretizações, necessariamente, inclui lógica para decidir, com ou sem a intervenção do operador ou provocando, se estas características, elementos e / ou etapas sejam introduzidos ou ser realizada em qualquer concretização particular. Nenhuma característica única ou grupo de recursos é necessário para ou indispensável para qualquer concretização particular. Os termos "compreendendo", "incluindo", "ter", e outros, são sinônimos e são utilizadas, inclusive, de uma forma aberta, e não excluem elementos adicionais, recursos, atos, operações e assim por diante. Além disso, o termo "ou" é usado no seu sentido inclusivo (e não no seu sentido exclusivo), de modo que, quando usado, por exemplo, para ligar uma lista de elementos, o termo "ou" significa um, alguns ou todos os elementos na lista.

[0086] Os exemplos de cálculos, simulações, os resultados, os gráficos, os valores e parâmetros das concretizações aqui descritas destinam-se a ilustrar e não a limitar as concretizações reveladas. Outras concretizações

podem ser configuradas e / ou operados de forma diferente dos exemplos ilustrativos aqui descritos.

REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho para a aceleração e a compressão do plasma (10, 1000), **caracterizado pelo** fato de que compreende:

um acelerador de plasma (100, 1100) compreendendo um eletrodo tubular exterior (16b) e um eletrodo tubular interior (115, 1015) que se estende no interior do eletrodo externo, de tal modo que um canal de propagação de plasma anular (118, 1118) é definido entre os mesmos para a aceleração e compressão de um toro de plasma (13, 1013) através do mesmo, o acelerador (100, 1100) possuindo uma entrada (112, 1112) para receber o toro de plasma (13, 1013) a partir de um gerador de plasma (12, 1012), uma saída (140, 1140) para a descarga de um toro de plasma (13, 1013) acelerado e comprimido, o canal de propagação de plasma (118, 1118) tendo uma seção alongada longitudinalmente (120, 1120) com uma extremidade a montante (114a, 1114a) em comunicação fluídica com a entrada e uma extremidade a jusante em comunicação fluídica com a saída (140, 1140), e em que uma folga anular transversal definida como uma distância radial entre os eletrodos interno (115, 1015) e externo (16b) diminui não linearmente em uma direção a jusante ao longo do comprimento da seção alongada (120, 1120); e

uma fonte de energia (24, 1024) eletricamente acoplada ao acelerador (100, 1100) e configurada para fornecer um impulso de aceleração elétrica que produz uma corrente que flui no acelerador (100, 1100) e gera um fluxo de impulso magnético por trás o toro de plasma (13, 1013) que é suficiente para empurrar o toro de plasma a partir da extremidade a montante e através da seção alongada (120,

1120) para a extremidade a jusante e a saída (140, 1140) do acelerador;

em que o aparelho é configurado para ter uma indutância predeterminada antes da seção alongada (120, 1120) tal que o toro de plasma (13, 1013) é acelerado e comprimido em toda a seção alongada (120, 1120) por uma expansão do um fluxo de impulsão magnético , e em que as dimensões do canal de propagação de plasma (118, 1118) são selecionados, de tal modo que, para uma selecionada indutância da seção alongada (120, 1120) e da indutância selecionada antes da seção alongada (120, 1120), a corrente que flui na seção alongada (120, 1120) na extremidade a jusante (140) é menor do que na extremidade a montante (114a, 1114a) da seção alongada (120, 1120) e uma pressão de toro do plasma é maior na extremidade a jusante (140, 1140) da seção alongada (120, 1120) do que na extremidade a montante (114a, 1114a) da seção alongada (120, 1120) .

2. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que a seção alongada(120, 1120) tem uma taxa de compressão radial de toro de plasma compreendida entre 1 e 2.

3. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que o canal de propagação de plasma anular (118, 1118) do acelerador de plasma é moldado de forma que o toro de plasma é simultaneamente acelerado e comprimido através do mesmo a partir da entrada (112, 1112) do acelerador (100, 1100) para a saída (140, 1140) do acelerador (100, 1100) .

4. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que o canal de propagação de plasma (118, 1118) comprehende ainda uma seção afunilada de compressão elevada (110, 1110) entre a entrada (112, 1112) e a extremidade a montante (114a, 1114a) da seção alongada (120, 1120), a seção afunilada (110, 1110) comprehendendo uma extremidade a montante em comunicação fluídica com a entrada (112, 1112) e uma extremidade a jusante (114, 1114) em comunicação fluídica com a extremidade a montante (114a, 1114a) da seção alongada (120, 1120), em que uma folga anular transversal na seção afunilada (110, 1110) definida como uma distância radial entre os eletrodos interno (115, 1015) e externo (16b) diminui em direção a jusante ao longo do comprimento da seção afunilada (110, 1110).

5. Aparelho, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo** fato de que a seção afunilada (110, 1110) tem uma taxa de compressão radial de entre 3 e 10.

6. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que a seção alongada (120, 1120) tem uma razão fixada de raios de eletrodo interno (115, 1015) e eletrodo externo (16b), e o raio $r(z)$ de um dos eletrodos internos ou externos ao longo de uma posição z no sentido do comprimento da seção alongada (120, 1120) é definida por

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

em que z_0 é uma posição longo do comprimento da seção alongada (120, 1120) na extremidade a montante (114a, 1114a), c é uma razão de indutância por unidade de comprimento L' da

seção alongada (120, 1120) a indutância L_0 antes da seção alongada (120, 1120),

$$a = b + l / r_0$$

em que r_0 é o raio do eletrodo interno (115, 1015) ou externo (16b) na extremidade a montante (114a, 1114a), e

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

em que r_1 e z_1 são o respectivo raio do eletrodo interno (115, 1015) ou externo (16b) e a posição longitudinal da seção alongada (120, 1120) na extremidade a jusante (140, 1140).

7. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que o raio $r(z)$ de cada um dos eletrodos interno (115, 1015) e externo (16b) ao longo de uma posição z no sentido do comprimento da seção alongada (120, 1120) é definida por

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

em que z_0 é uma posição ao longo do comprimento da seção alongada (120, 1120) na extremidade a montante (114a, 1114a), c é a razão entre indutância por unidade de comprimento L' da seção alongada (120, 1120) a indutância L_0 antes da seção alongada (120, 1120),

$$a = b + l / r_0$$

em que r_0 é o raio do eletrodo interno (115, 1015) ou externo (16b) na extremidade a montante (114a, 1114a), e

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

em que r_1 e z_1 são o respectivo raio do eletrodo interno (115, 1015) ou externo (16b) e a posição longitudinal da seção alongada (120, 1120) na extremidade a jusante (140, 1140).

8. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que a fonte de energia (24, 1024) é configurada para gerar um impulso elétrico de aceleração, que para uma vez que o toro de plasma (13, 1013) de entra na seção alongada (120, 1120).

9. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo** fato de que a fonte de energia (24, 1024) é configurada para gerar um impulso elétrico com uma aceleração de tempo, duração e amplitude da corrente que resulta em um fluxo de impulsão constante quando o toro de plasma (13, 1013) desloca-se ao longo da seção alongada (120, 1120).

10. Sistema **caracterizado pelo** fato de que compreende o aparelho de aceleração e compressão de plasma (10, 1000) conforme definido por qualquer uma das reivindicações 1 a 9, e

um gerador de plasma (12, 1012) compreendendo um eletrodo tubular exterior (16a) e um eletrodo tubular interior (14, 1014) que se estende no interior do eletrodo exterior (16a) para definir entre eles um canal de formação de plasma anular (17),

em que o eletrodo exterior (16b) do acelerador (100, 1100) está fisicamente conectado ao eletrodo exterior (16a) do gerador de plasma (12, 1012), e em que o canal anular de formação de plasma (17) está alinhado e em comunicação fluídica com o canal anular de propagação de plasma (118, 1118).

11. Sistema, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo** fato de que compreende ainda uma região de relaxamento de toro de plasma (50) definida por uma parede interior do eletrodo exterior (16a, 16b) e um espaço entre a extremidade a montante do eletrodo interior (115, 1015) do acelerador e uma extremidade a jusante do eletrodo interno do gerador de plasma (14, 1014), e em que a região de relaxamento (50) está em comunicação fluídica com o canal de formação do plasma (17) e o canal de propagação de plasma (118, 1118).

12. Sistema, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo** fato de que a região de relaxamento (50) compreende uma zona de expansão interna, formada na extremidade a montante do eletrodo interior do acelerador (115, 1015).

13. Sistema, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo** fato de que a região de relaxamento (50) compreende uma zona de expansão para o exterior, formada na extremidade a montante do acelerador (115, 1015) no eletrodo exterior (16b).

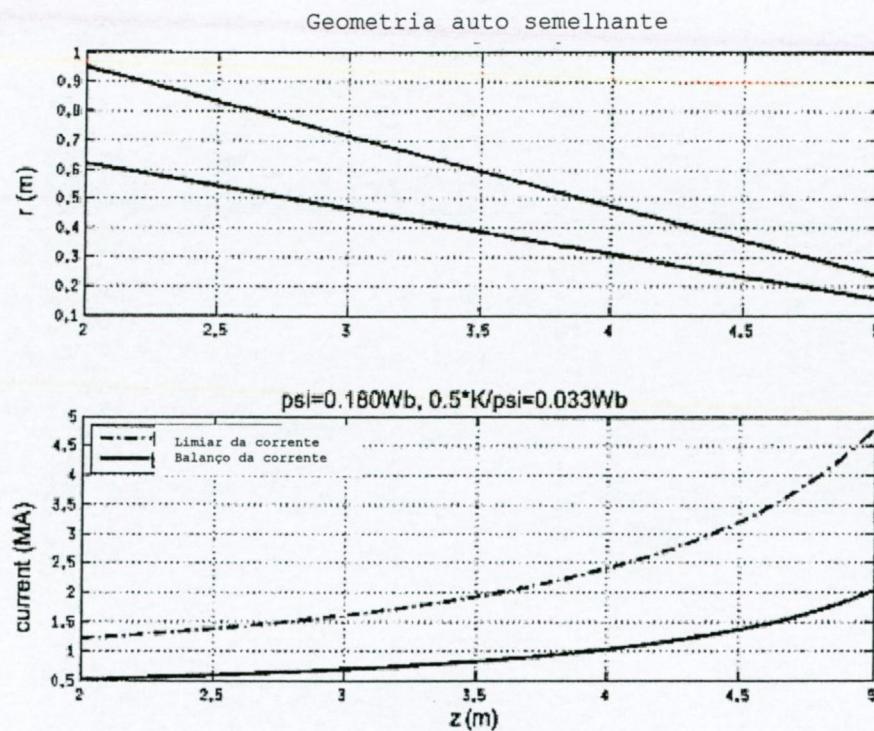


FIG. 1A

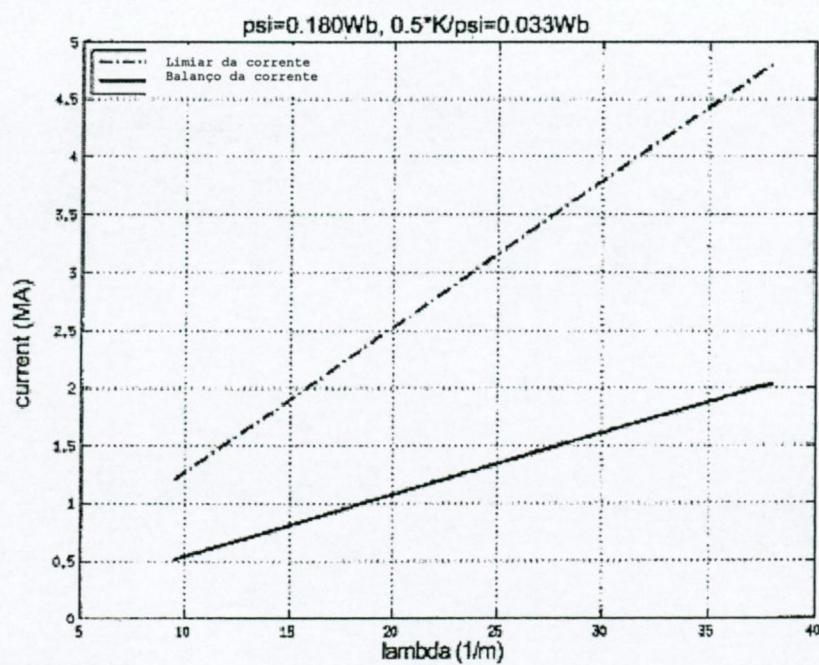


FIG. 1B

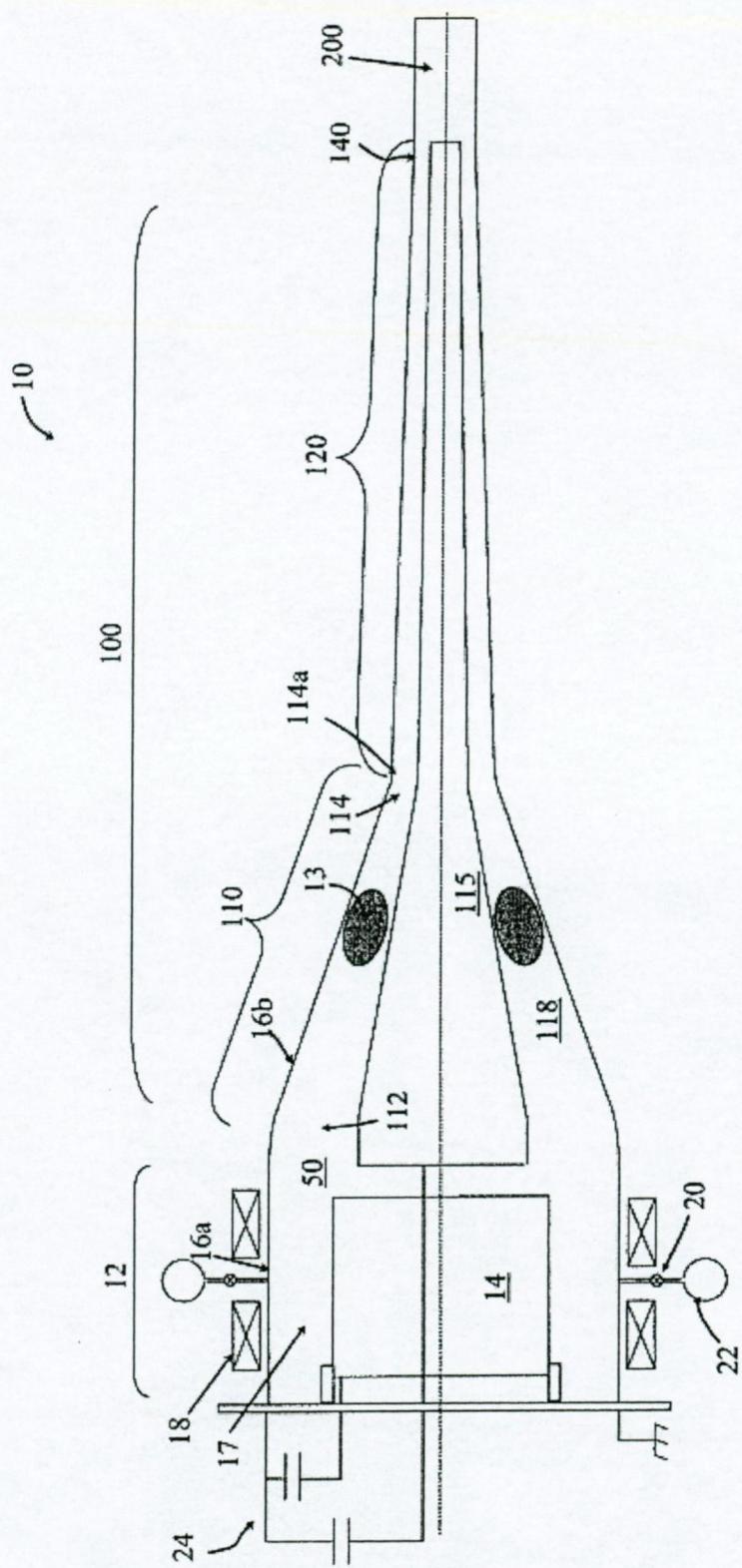


FIG. 2

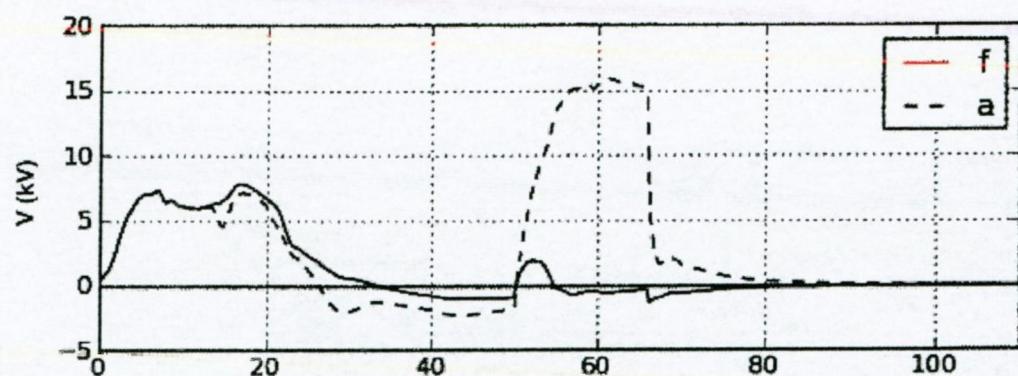


FIG. 3A

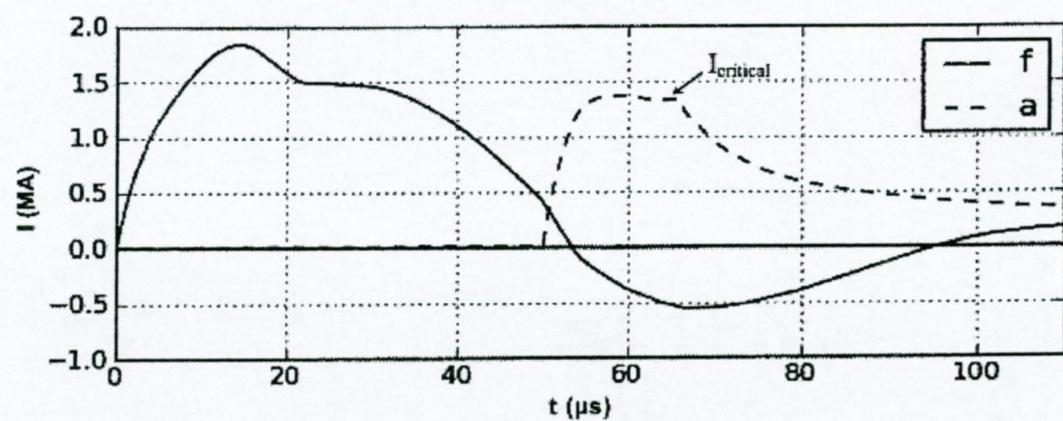
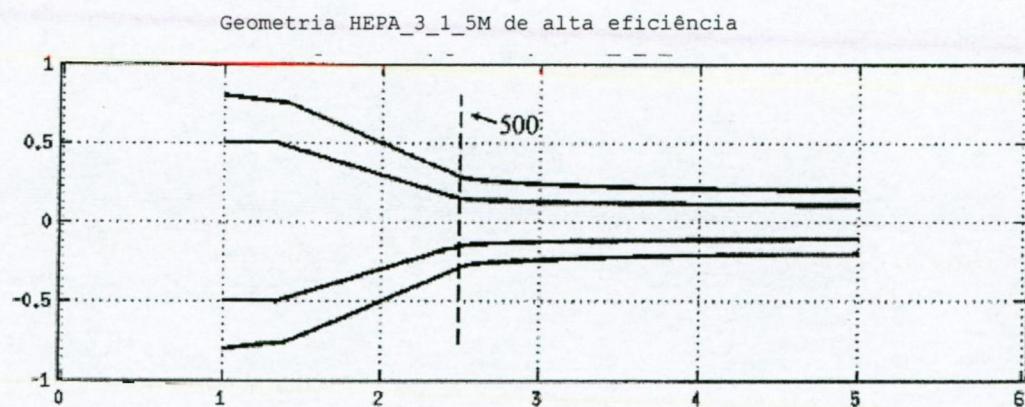
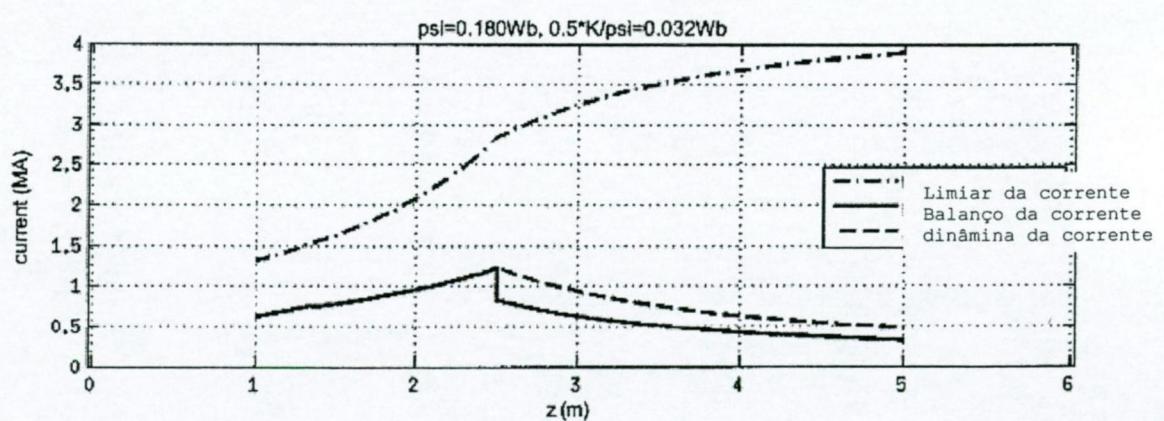


FIG. 3B

**FIG. 4A****FIG. 4B**

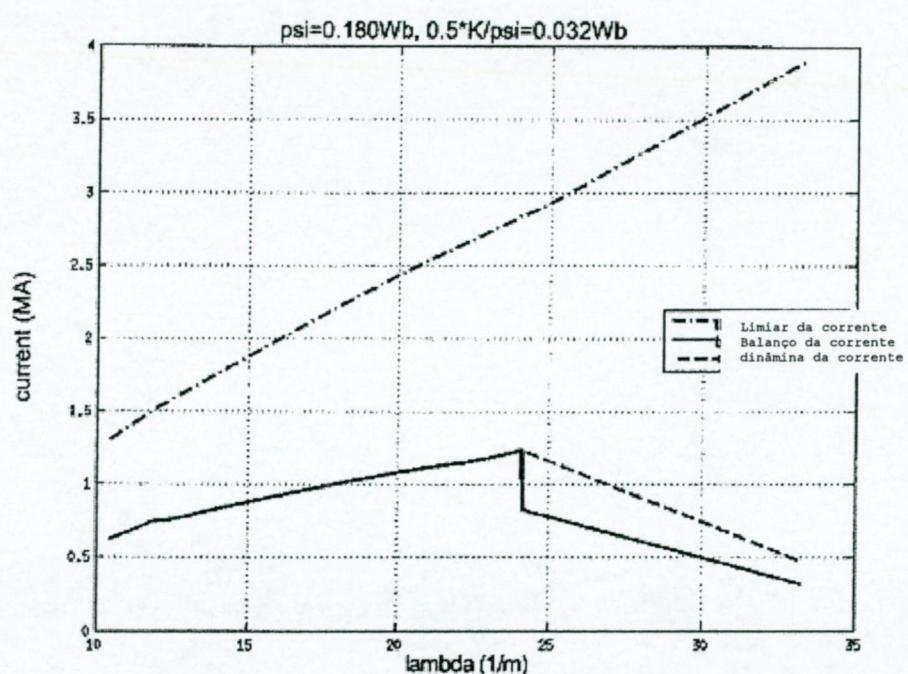


FIG. 5

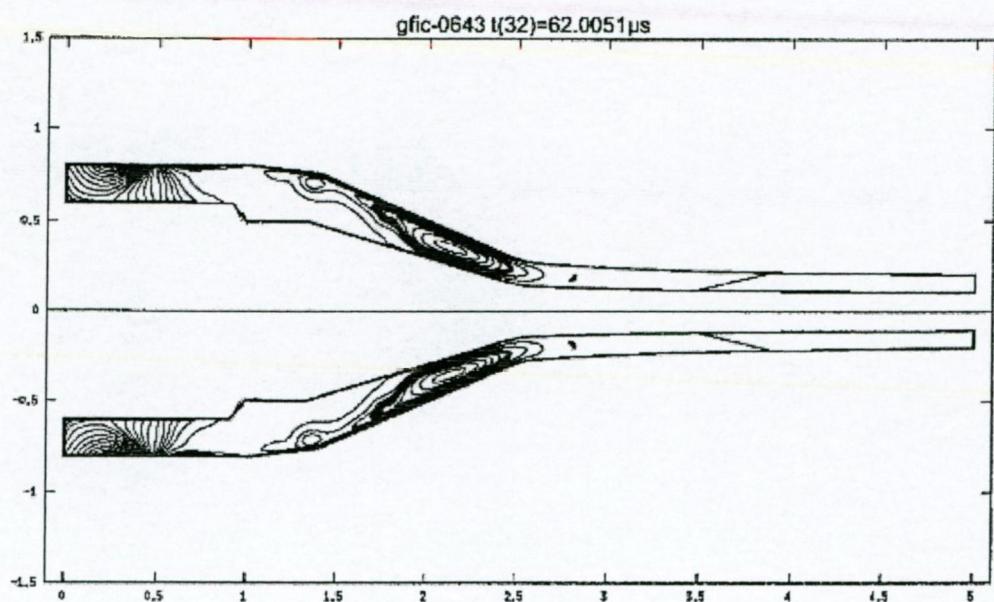


FIG. 6A

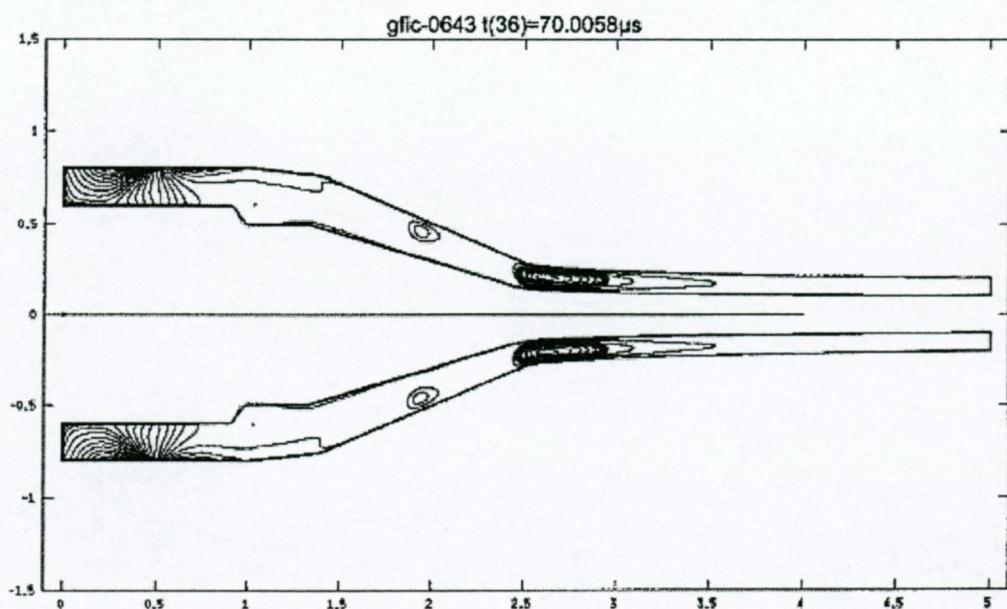


FIG. 6B

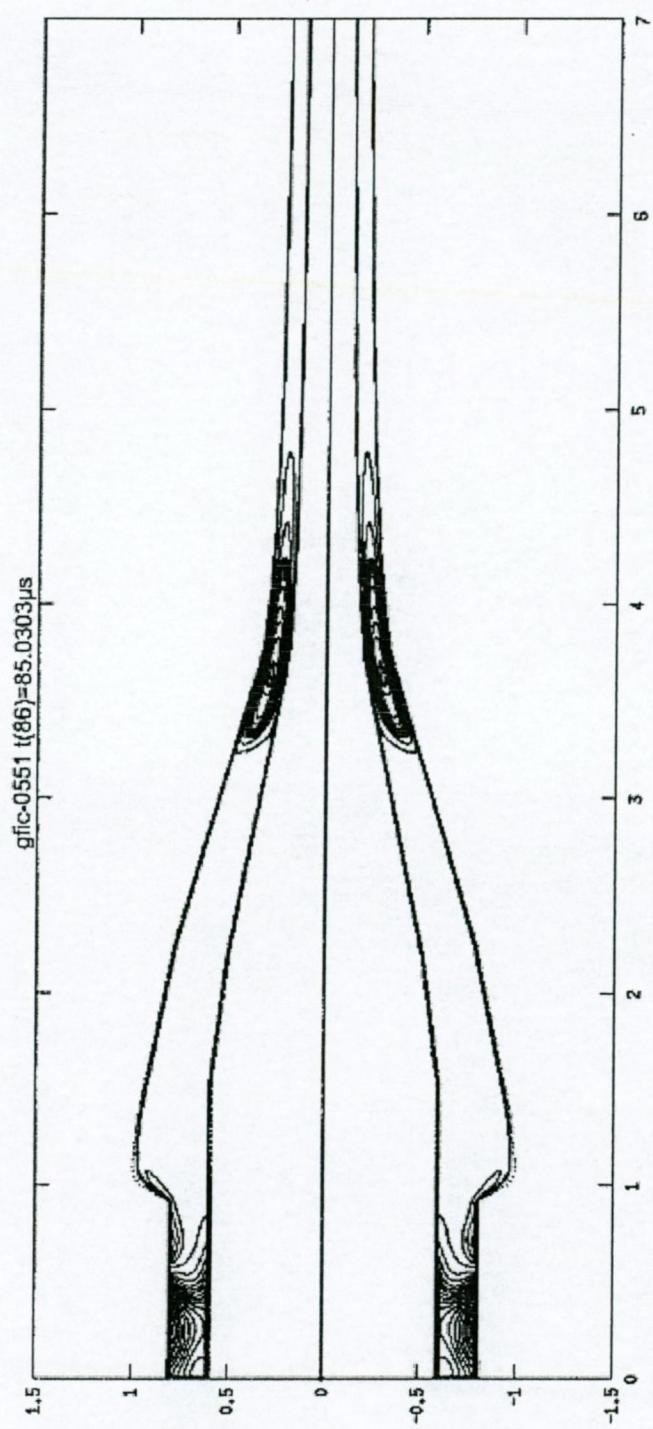


FIG. 7

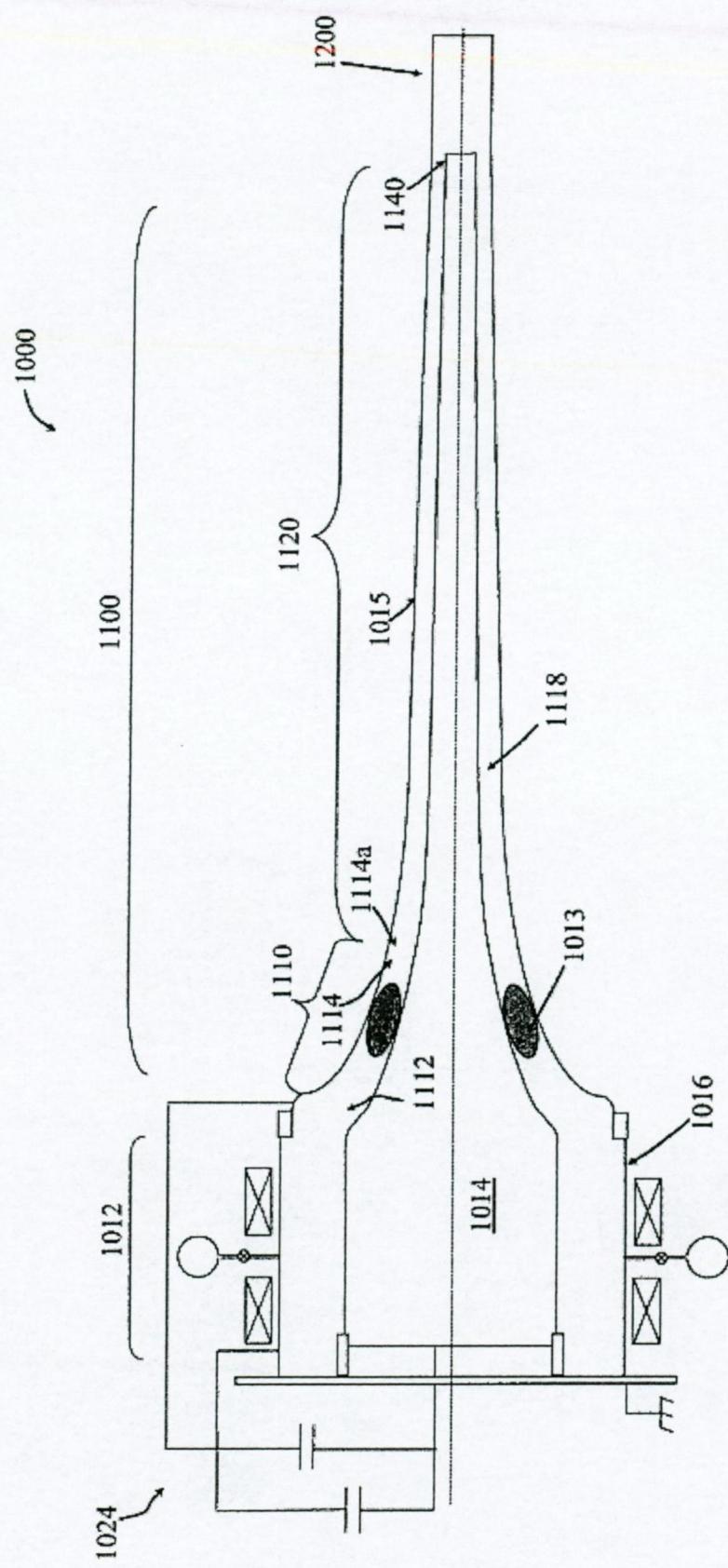
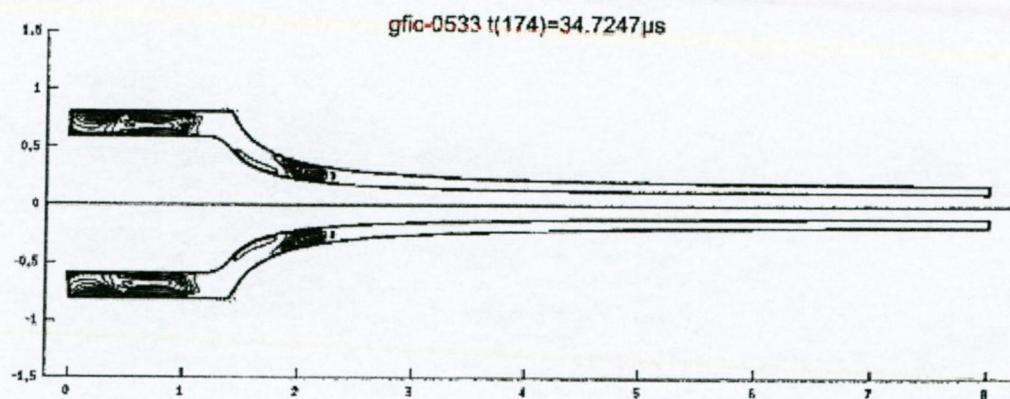
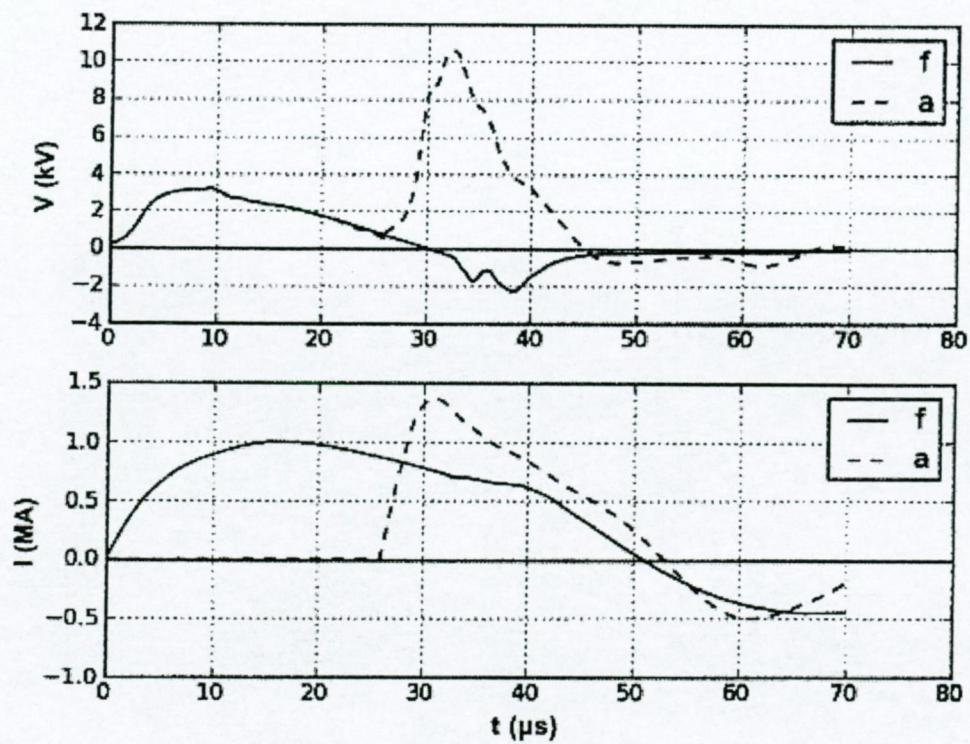


FIG. 8

**FIG. 9A****FIG. 9B**