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

(21) BR 102020007026-6 A2

(22) Data do Depósito: 08/04/2020

(43) Data da Publicação Nacional: 13/10/2021

(54) Título: DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO

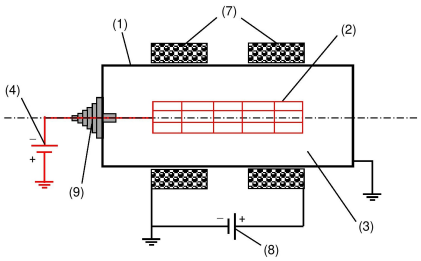
(51) Int. Cl.: G21B 1/03; G21B 1/05; H05H 1/02.

(52) CPC: G21B 1/03; G21B 1/05; H05H 1/02.

(71) Depositante(es): COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR.

(72) Inventor(es): EDUARDO LOBOLUSTOSA CABRAL; GAIANÊ SABUNDJIAN; JOSÉ RODRIGUES DE LIMA; SEUNG MIN LEE; LEONID RUCHKO; MARIA ALICE MORATO RIBEIRO; ALTAIR ANTONIO FALOPPA; GERSON FAINER; FERNANDO DE CASTRO JUNQUEIRA; SAMUEL CARRACCIOLI SANTOS.

(57) Resumo: DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO. Essa patente propõe um dispositivo para Fusão Nuclear por Confinamento Eletrostático Inercial Assistido por Campo Magnético (MAIECF), cuja finalidade é minimizar a perda da capacidade de confinamento do campo elétrico dos atuais dispositivos de fusão nuclear por confinamento eletrostático inercial (IECF), usando para isso um campo magnético. Esse dispositivo é compreendido por uma câmara de vácuo de formato cilíndrico, um catodo composto por uma malha de fios metálicos, um ou mais solenóides cilíndricos, um sistema gerador de vácuo, uma fonte de alta tensão elétrica de corrente contínua, uma fonte de alta corrente elétrica contínua e um isolante elétrico. A câmara de vácuo é preenchida com um gás a baixa pressão, capaz de sofrer reações de fusão nuclear, e sua carcaça é mantida aterrada fazendo a função de anodo. O campo magnético gerado pelos solenóides posicionados em volta da câmara de vácuo confina os elétrons gerados pelo campo elétrico de alta magnitude. Evitando a perda de elétrons consegue-se: evitar a perda da energia que seria levada embora com os elétrons que escapam do dispositivo; evitar descargas elétricas entre o catodo e anodo; manter o plasma neutro (ou quase (...).



DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO

[001] O presente relatório refere-se a um dispositivo de fusão nuclear por confinamento eletrostático inercial assistido por campo magnético. Fusão nuclear com Confinamento Eletrostático Inercial, ou em inglês, *InertialElectrostaticConfinementFusion* (IECF), consiste de uma forma tecnologicamente simples e econômica de gerar fusão nuclear em pequenos equipamentos. Sistemas IECF confinam um plasma em um fosso potencial gerado por campos elétricos. O campo elétrico é gerado por eletrodos na forma de grades, tipicamente em geometria esférica ou cilíndrica. Vários esquemas desse dispositivo foram implementados por diversas equipes e pesquisadores (Farnsworth, P. T. - Electric discharge device for producing interactions between nuclei, *USA Patent* #3.258.402, 1966; Hirsch R. e Meeks G. A. - Apparatus for generating fusion reactions, *USA Patent* #3.530.497, 1970; Brussard, R. W. - Some Physics considerations of magnetic inertial electrostatic confinement: a new concept for spherical converging-flow fusion, *Fusion Technology*, Vol. 19, No. 273, 1991; Krall, N. A. - The Polywell: a spherically convergent ion focus concept, *Fusion Technology*, Vol. 22, pág. 42-49, 1992; Barnes, D. C. et al. - Production and application of dense Penning Trap Plasmas, *Physics of Fluids B,* Vol. 5, pág. 3651, 1993; Nebel, R. A. e Barnes, D. C. - The periodically oscillating plasma sphere, *Fusion Technology*, Vol. 38, No. 28, 1998; Shrestha, P. J. et al - Study of dipole-assisted inertial electrostatic confinement, *Symposium in Fusion Energy*, Knoxville, 2005; McGuire, T. J. e Sedgwick, R. J. - Improved Confinement in Inertial Electrostatic Confinement for Fusion Space power Reactors, *AIAA J. of Propulsion and Power*, Vol. 21, 2005; Klein, A. - The Multiple Ambipolar Beam Line Experiment (MARBLE*), 13th U.S.-*

Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, Sydney, AU, 2011; Knapp, D. R. - Planar geometry inertial electrostatic confinement fusion device, *Journal of Physics: Conference Series* 591, 2015).

[002] O esquema mais comum de um dispositivo IECF utiliza eletrodos concêntricos com formatos esféricos (Hirsch R. e Meeks G. A. - Apparatus for generating fusion reactions, *USA Patent* #3.530.497, 1970). Nesse dispositivo, a carcaça, que consiste de uma câmara de vácuo com formato esférico, é aterrada funcionando como anodo. Um potencial elétrico negativo é aplicado em um catodona forma de uma grade esférica, posicionado no centro da câmara de vácuo, gerando um campo elétrico radial. Esse campo elétrico acelera os íons contidos dentro da câmara de vácuo em direção ao centro, onde ocorrem as reações de fusão.

CAMPO TÉCNICO DA INVENÇÃO

[003] A simplicidade tecnológica dos sistemas IECF consistiu na base de seu sucesso inicial. Na década de 1960, sistemas IECF foram capazes de gerarem regime permanente cerca de $2x10^9$nêutrons/s (Elmore, W. C. et al. - On the inertial electrostatic confinement of a plasma, *Physics of Fluids*, Vol. 2, 1959; Farnsworth, P. T. - Electric discharge device for producing interactions between nuclei, *USA Patent* #3.258.402, 1966;Hirsh, R. - Inertial electrostatic confinement of ionized fusion gases, *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 11, pág. 4522, 1967).

[004] Uma das grandes vantagens dos dispositivos IECF é que não é necessária uma instalação industrial sofisticada para construir um desses dispositivos. Atualmente esses dispositivos são utilizados como fonte de nêutrons (Sved, J. - The commercial IEC Portable Neutron Source, *Trans. of the ANS*, Vol. 77, 504, 1997;Ohnishi, M. et al. - Correlation between potential well structure and neutron production in inertial electrostatic confinement fusion,

Nuclear Fusion, Vol. 37 (5), 2001; Takamatsu, T. et al. - Inertial electrostatic confinement fusion device with an ion source using a magnetron discharge, *Nuclear Fusion*, Vol. 46 (1), 2005). Contudo, existem diversas aplicações comercias que poderiam ser desenvolvidas em curto prazo para um dispositivo IECF, tais como, produção de radioisótopos, radioterapia, análise por ativação de nêutrons etc (Kulcinski, G. L. et al. – Alternative applications of fusion–production of radioisotopes," *Fusion Science and Technology*, Vol. 44, 559, 2003).

[005] Em um dispositivo IECF, os íons são acelerados pelos eletrodos em vários keV de forma que o aquecimento do plasma não é necessário. As reações de fusão ocorrem entre íons e átomos neutros do gás, que preenche o dispositivo, e entre íons e íons. Enquanto 45 milhões de graus kelvin é uma temperatura muito elevada, a tensão elétrica correspondente é somente 4 kV.

[006] Existem diversas reações de fusão que liberam energia e podem ser utilizadas para gerar energia. Nos reatores de fusão que usam confinamento do plasma por campo magnético somente a reação deutério-trítio é considerada em razão da limitação existente na intensidade dos campos magnéticos. Nos dispositivos IECF diversas reações de fusão são possíveis de ocorrer, pois se pode operar praticamente com qualquer temperatura de plasma, bastando para isso ajustar a tensão nos eletrodos. Essa é outra grande vantagem dos dispositivos IECF em relação aos reatores que usam confinamento magnético. As reações de fusão nuclear que são utilizadas atualmente nos dispositivos IECF são: deutério-deutério, deutério-trítio e deutério-^{3}He (Subamanian, K. M. – Diagnostic study of steady state advanced fuel (D-D and D-3He) fusion in a IEC device, Ph.D. Thesis, Fusion Technology Institute, Universityof Wisconsin, December, 2004).

ESTADO DA TÉCNICA

[007] Historicamente, a maior parte das pesquisas realizadas em fusão nuclear está direcionada à produção de energia utilizando-se duas configurações básicas: confinamento magnético e confinamento inercial com uso de laser. Essas duas configurações podem eventualmente dar origem a um reator de fusão viável, contudo, esses reatores tendem a serem grandes, complicados e exigirem um alto investimento financeiro.

[008] Os dispositivos IECF consistem em um conceito diferente de fusão nuclear tendo como base a aceleração eletrostática de íons formando um núcleo de plasma. O primeiro pesquisador a sugerir campo elétrico para confinamento de íons, dando origem a esse conceito de fusão nuclear foi Salisbury (Salisbury, W. W. – Method and apparatus for producing neutrons", *USA Patent* #2.489.436,1949). Mais tarde, conceitos melhores foram propostos por Elmore et al., Farnsworth e Hirsh (Elmore, W. C. et al. - On the inertial electrostatic confinement of a plasma, *Physics of Fluids*, Vol. 2, 1959; Farnsworth, P. T. - Electric discharge device for producing interactions between nuclei, *USA Patent* #3.258.402, 1966;Hirsh, R. - Inertial electrostatic confinement of ionized fusion gases, *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 11, pág. 4522, 1967). Nesses dispositivos a diferença de potencial elétrico gerado por grades concêntricas, de geometria esférica ou cilíndrica, mantinha as partículas carregadas confinadas no centro do dispositivo, formando um núcleo de plasma. Esses dispositivos foram chamados na época de Fusor e operavam a pressões muito baixas, da ordem de 10^{-4} a 10^{-7}mTorr, sendo necessário gerar os íons externamente e injetá-los no dispositivo usando aceleradores.

[009] Nos seus experimentos Hirsh (Hirsh, R. – Inertial electrostatic confinement of ionized fusion gases, *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 11, pág. 4522, 1967) obteve taxas de geração de nêutrons da ordem de 10^7

nêutrons/s utilizando reações deutério-deutério e da ordem de 10^9 nêutrons/s utilizando deutério-trítio. Vários modelos do Fusor foram construídos na década de 1960 e embora tenha tido um sucesso relativo, o Fusor apresentou problemas quando tentaram aumentar seu tamanho. Na medida em que o Fusor era abastecido com íons via acelerador, a quantidade de íons fornecida era muito pequena para gerar um número significativo de reações de fusão.

[010] Hirsch e Meeks (Hirsch R. e Meeks G. A. - Apparatus for generating fusion reactions, *USA Patent* #3.530.497, 1970) propuseram uma nova forma de operar um Fusor. O seu dispositivo operava com gás a pressões maiores, da ordem de mTorr, de forma que os aceleradores para geração dos íons não eram mais necessários e descargas elétricas eram suficientes para fornecer os íons necessários. Uma vez ionizados, os íons aceleravam para o eletrodo interno (com carga negativa) o atravessavam e formavam um plasma na região central do dispositivo, onde ocorriam as reações de fusão. Com esse dispositivo foram obtidas taxas de geração de nêutrons de até 10^{10} nêutrons/s, a maior obtida até então. Esse conceito do dispositivo de Hirsch e Meeks continua a ser utilizado até hoje.

[011] Os dispositivos IECF comuns apresentam uma relação entre potência gerada e potência fornecida de cerca de 0,1% quando a reação de fusão utilizada é deutério-trítio. Isso ocorre em razão de perdas de energia em diversas formas. Os principais problemas encontrados nos dispositivos IECF que limitam a sua produção de energia são: perda de íons por choque com o catodo devido à presença da grade; perda de elétrons; e acumulação de carga elétrica no campo elétrico.

[012] A presença do catodo na forma de grade é o principal problema nos dispositivos IECF. Embora se possa aplicar um campo elétrico suficientemente grande para acelerar os íons para energias relevantes para

fusão, muitos são interceptados pela grade catódica, resultando em uma significativa perda de energia. A transparência do catodo teria que ser inacreditavelmente boa na medida em que um íon tem que passar pelo catodo inúmeras vezes antes de sofrer uma reação de fusão. Assim, a probabilidade de perda de íons por choque (absorção) na grade do catodo tende a ser maior do que a probabilidade de um íon sofrer fusão.

[013] O campo elétrico dentro de um dispositivo IECF forma um fosso de potencial elétrico que confina íons. Contudo, um fosso de potencial elétrico não pode confinar simultaneamente íons e elétrons, ou seja, um fosso potencial negativo para confinamento de íons é um acelerador para elétrons. Dessa forma, não é possível confinar um plasma neutro usando somente um arranjo de eletrodos. Assim, se for criado um fosso de potencial elétrico para íons, então, em princípio os elétrons escaparão do dispositivo. A perda de elétrons consiste em uma perda de energia equivalente à energia necessária para liberar um elétron de um átomo do gás neutro ou do catodo, adicionada à energia adquirida pelo elétron no campo potencial.

[014] Talvez mais importante do que a perda de energia associada à fuga de elétrons, é o fato de que ao aplicar um campo elétrico de alta intensidade em um gás, o gás é ionizado e é gerado um plasma. Como a resistência elétrica de um plasma é muito baixa, se os elétrons ficarem livres para escapar do dispositivo cria-se uma condição para formar descargas elétricas de alta intensidade entre o catodo e o anodo. Uma descarga elétrica desse tipo consiste na prática em um curto circuito na fonte de alta tensão. Dado que a fonte não suporta a corrente elétrica da descarga, ela é desligada e as reações cessam. Assim, a perda de elétrons é um dos maiores problemas dos atuais dispositivos IECF que impede a obtenção de condições para manter as reações de fusão de forma sustentável.

[015] Além disso, se os elétrons escapam do dispositivo não é possível manter um plasma neutro, pois nesse caso existirão regiões onde a densidade de carga elétrica dos íons dominará e, na medida em que a densidade aumenta, em um dado momento a carga total positiva dos íons pode destruir o fosso de potencial elétrico. As regiões de acumulação de carga elétrica positiva representam um limite superior para a densidade dos íons e, consequentemente, um limite a potência gerada pelo dispositivo.

[016] Em razão das vantagens que os dispositivos IECF apresentam, muitos conceitos novos estão sendo propostos na tentativa de eliminar os problemas presentes nesses dispositivos. Alguns desses dispositivos são apresentados a seguir.

[017] Com o objetivo de diminuir a perda de íons por choque com a grade do catodo central, McGuirre e Sedgwick, e Dietrich et al. propuseram um dispositivo IECF com múltiplos eletrodos na forma de grades (McGuire, T. J. e Sedgwick, R. J. – Improved Confinement in Inertial Electrostatic Confinement for Fusion Space Power Reactors, *AIAA J. of Propulsion and Power*, Vol. 21, 2005; McGuire, T. J. e Sedgwick, R. J. – Numerical prediction sofenhancedion confinement in a multi-grid IEC device, *AIAA-2008-4675, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE JPC*, Hartford, 2008; Dietrich, C. C. et al. - Experimental Verification of Enhanced Confinement in a Multi-grid IEC Device, *AIAA-2008-4760, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE JPC*, Hartford, CT, 21-23, 2008). Segundo os autores, nos dispositivos IECF com um único catodo central as interações coulombianas entre íon-íon na região central fazem com que as trajetórias dos íons se tornem caóticas e com isso rapidamente se chocam com o catodo. A introdução de múltiplos eletrodos concêntricos na forma de grades cria feixes de íons nas aberturas das grades aumentando, assim, o tempo médio de vida dos íons. No dispositivo proposto pelos autores,

o eletrodo central tem um potencial levemente superior em relação aos demais que possuem raios maiores. Esse eletrodo central funciona como um anodo que confina elétrons criando, assim, um catodo virtual no centro do dispositivo. Posteriormente, Sedgwick e Hall propuseram uma modificação nesse dispositivo com o objetivo de diminuir a perda de elétrons da região central utilizando uma placa magnetizada, na forma de uma esfera furada, no lugar do eletrodo central em forma de grade (Sedgwick, R. J. e Hall, G. L. M. - Magnetic core multi-gridinertial electrostatic confinement conceptusing p-11B. In: Nuclear and emerging technologies for space, The Woodlands, 2012). Segundo os autores essa placa magnetizada, além de diminuir o espalhamento de elétrons da região central, é mais eficiente para direcionar os feixes de íons e evitar choque dos íons com a grade do catodo.

[018] Um conceito interessante de dispositivo é a Esfera de Plasma com Oscilação Periódica (POPS). Esse conceito foi proposto por Nebel e Barnes e posteriormente confirmado experimentalmente por Park et al. (Nebel, R. A. e Barnes, D. C. - The periodically oscillating plasma sphere, *Fusion Technology*, Vol. 38, No. 28, 1998; Park; J. et al. - Experimental observation of a periodically oscillating plasma sphere in a gridded electrostatic confinement device, *Physical Review Letters*, Vol. 95, No. 1, 2005). O POPS consiste basicamente de um novo modo de operação de um dispositivo IECF de eletrodos na forma de grades. Nesse modo de operação, ondas de radiofreqüência criam oscilações radiais e periódicas no núcleo de plasma, aumentando a densidade e temperatura do plasma na fase de colapso da oscilação, quando todos os íons convergem para o centro. Uma das propriedades do POPS é manter o equilíbrio do plasma em uma distribuição “Maxwelliana”. Isso praticamente elimina as perdas devido a colisões íon-íon e aumenta a taxa de geração de

nêutrons. Contudo, apesar de obter plasmas com maior densidade e energia, esse conceito não confina os elétrons.

[019] Pesquisadores da Universidade de Illinois desenvolveram um novo conceito de IEC onde combinam o campo eletrostático com um campo magnético (Shrestha, P. J. et al. – Study o fdipole-assisted inertial electrostatic confinement, *Symposium in Fusion Energy*, Knoxville, 2005; Takamatsu, T. et al. – Inertia lelectrostatic confinement fusion device with anions ourceusing a magnetron discharge, *Nuclear Fusion*, Vol. 46 (1), 2005). O campo magnético é gerado por um dipolo colocado no centro da esfera. Teoricamente, o campo magnético aumenta a densidade do plasma na região central do dispositivo e os campos eletrostático e magnético combinados reduzem as perdas do plasma. Um protótipo desse conceito foi construído e testado para verificar experimentalmente suas vantagens. Nesse experimento foi verificado que o campo magnético aumenta a densidade de elétrons em cerca de 20 vezes, diminui a temperatura dos elétrons e diminui a tensão elétrica aplicada, para uma mesma taxa de geração de nêutrons, quando comparado a um dispositivo IECF comum de grades. Esse dispositivo foi construído com a finalidade de propulsão espacial, assim, uma das funções do dipolo colocado no interior do dispositivo era gerar um “jato” de íons que seria utilizado para propulsão.

[020] Existem conceitos de IECF que tem como objetivo eliminar o problema da perda de íons por choque na grade do catodo usando um catodo virtual, ou seja, eliminando fisicamente o catodo. Esses conceitos são o Polywelle o Penning Trap. O Polywell é apresentado nos trabalhos liderados por Krall, Carr e Cornish (Krall, N. A. - The Polywell: a spherically convergent ion focus concept, *Fusion Technology*, Vol. 22, pág. 42-49, 1992; Krall et al. - Forming and maintaining a potential well in a quasi spherical magnetic trap, *Physics of Plasmas*, Vol. 2, pág.146-158, 1995; Carr, M. e Khachan, J. - The

dependence of the virtual cathode in a Polywell on the coil current and background gas pressure, *Physics of Plasmas,* Vol. 17, 2010; Carr, M. et al. - Low beta confinement in a Polywell modelled with conventional point cusp theories, *Physics of Plasmas*, Vol. 18, 2011; Cornish, S. et al. - The dependence of potential well formation on the magnetic field strength and electron injection current in a Polywell device, *Physics of Plasmas*, Vol. 21, 2014). O conceito Penning Trap fo idesenvolvido por Barnes, Schauer e associados (Barnes, D. C. et al. - Production and application of dense Penning Trap Plasmas, *Physics of Fluids B,* Vol. 5, pág. 3651, 1993; Barnes, D. C. et al. - Beyond the Brillouin Limit with Penning Fusion experiment, *Physics of Plasma*, Vol. 4, pág. 1745, 1997; Schauer, M. M. et al. - Physics of non-thermal Penning-trap electron plasma and application to ion trapping, *Physics of Plasmas*, Vol. 11, 2004; Barnes, D. C.- Penning Traps as Neutron Sources, *16th US-Japan Workshop on Fusion Neutron Sources for Nuclear Assay and Applications*, Madison, WI, 2014).

[021] O conceito da configuração Pollywell é utilizar um campo magnético gerado por solenoides para confinar elétrons no centro do dispositivo formando, assim, um catodo virtual que confina os íons eletrostaticamente. Esse dispositivo consiste de um arranjo de solenoides posicionados como se estivessem nas faces de um cubo. O campo magnético formado pelos solenoides é nulo no centro do cubo (centro do dispositivo). Os elétrons são introduzidos dentro do dispositivo e são confinados pela configuração do campo magnético tridimensional por um tempo suficiente para formar um catodo virtual. Os íons são injetados com baixa energia ou são criados pela ionização do gás na superfície externa da nuvem de elétrons. Esses íons são atraídos pelo potencial elétrico negativo e convergem para o centro do cubo, dando origem a um núcleo de plasma. Pesquisas preliminares

concluíram que o conceito Polywell pode ser uma forma viável de gerar energia por meio de fusão nuclear, contudo, a perda de elétrons não é totalmente eliminada, pois eles ainda escapam pelos centros das faces, arestas e cantos do cubo, que são locais onde o campo magnético se anula. Além disso, a densidade de elétrons obtida é limitada e, portanto, o potencial elétrico gerado pela concentração de elétrons não é muito alto, limitando, assim, a energia dos íons e a taxa de reações de fusão.

[022] O conceito Penning Trap utiliza uma combinação de campos elétricos e magnéticos para confinar elétrons no centro do dispositivo. Esses elétrons criam um potencial elétrico negativo central que acelera os íons para o centro criando um núcleo de plasma. Um reator Penning Fusion seria constituído de milhões de módulos Penning Trap de alguns centímetros de diâmetro, cada um produzindo entre 30-300W de potência. Cada módulo é uma esfera dentro da qual está confinado um plasma neutro. Estudos indicam que um reator Penning Fusion pode gerar mais potência do que consome (Chacón, L. et al. - Energy gain calculations in Penning Fusion systems using a bounce-average Fokker-Planck model, *Physics of Plasma*, Vol. 7, No. 11, 2000). Contudo, esse tipo de dispositivo sofre as mesmas limitações do conceito Polyweel, ou seja, perda de elétrons e baixa densidade e energia dos íons.

[023] Na linha de eliminar a perda de íons por choque com o catodo pela eliminação física do catodo, Klein apresenta um dispositivo denominado Múltiplo Ambipolar Line Experiment (MARBLE) no qual os íons são acelerados na forma de um feixe linear em um ressonador eletrostático (Klein, A. - The Multiple Ambipolar Beam Line Experiment (MARBLE*), 13th U.S.-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Sydney, AU, 2011). O dispositivo é inspirado na armadilha linear eletrostática de íons desenvolvida por Andersen et al. e a armadilha anharmonic de Ermakov e Hinch (Andersen,

L. H. et al. – Physics with electrostatic rings and traps, *Journal of Physics* B, Vol. 37, R57–R88, 2004; Ermakov, A. V. e Hinch, B. J. – Na electrostatic auto resonantion trap mass spectrometer, *Review ofScientificInstruments*, Vol. 81, 2010). Contudo, esse tipo de armadilha não confina elétrons e, assim, o número de íons contidos nesse tipo de armadilha é limitado pela distribuição da carga elétrica imposta ao sistema. Assim, para aumentar a quantidade de íons no dispositivo, o MARBLE utiliza múltiplas armadilhas entrelaçadas no mesmo espaço físico. Porém, o fato de não confinar elétrons é um fator limitante do número de íons e, portanto, da taxa de reações de fusão.

[024] Outro dispositivo IECF que não utiliza eletrodos físicos dentro do plasma é apresentado por Knapp (Knapp, D. R. - Planar geometry in ertial electrostati cconfinement fusion device, *JournalofPhysics: Conference Series* 591, 2015), que o denominou Planar Geometry IECF Device. Esse dispositivo é baseado no MARBLE, que possui simetria cilíndrica em torno do eixo do feixe de íons. Tomando a seção transversal do MARBLE e a rotacionando em torno de um eixo central, perpendicular ao feixe de íons, o resultado é um dispositivo plano circular com eletrodos no formato de anéis presentes na parte superior e inferior do dispositivo. Em relação ao MARBLE esse dispositivo tem a vantagem de confinar um número maior de íons e, principalmente, de focalizar os íons vindos de todas as direções no centro do dispositivo circular. A focalização dos íons no centro aumenta a densidade de íons e consequentemente a taxa de reações de fusão. Contudo, esse dispositivo apresenta os mesmos problemas do MARBLE, ou seja, não confina elétrons e com isso a densidade de íons é limitada.

[025] Outra forma de diminuir a perda de íons por choque na grade do catodo e melhorar a eficiência dos dispositivos IECF de forma a conseguir um ganho líquido de energia gerada pelas reações de fusão é proposta por

Hedditch et al. (Hedditch, J. et al. - Fusion in a magnetically-shielded-grid inertial electrostatic confinement device, *Physics of Plasma*, Vol. 7, 2015). Os autores propõem uma forma de combinar o campo elétrico dos dispositivos IECF com campos magnéticos, formando um reator de fusão híbrido magnético-eletrostático. Nesse método os íons são confinados pelo campo elétrico, enquanto que o campo magnético serve para blindar a grade do catodo contra impactos dos íons e também para aumentar o tempo de confinamento dos elétrons. Com a blindagem do catodo produzida pelo campo magnético, espera-se que a perda de íons diminua consideravelmente e seja possível alcançar eficiência energética maior do que um. Contudo, somente um estudo teórico baseado em hipóteses muito simples é apresentado e a corrente elétrica para gerar o campo magnético necessário é muito elevada. A grande corrente elétrica exigida, associada ao fato dos solenoides geradores dos campos magnéticos ficarem localizados dentro do dispositivo e ao redor dos fios condutores do catodo, dificulta ou mesmo torna inviável a construção física do dispositivo proposto.

OBJETIVO DA INVENÇÃO

[026] O dispositivo proposto nessa patente tem por base um método de Fusão Nuclear por Confinamento Eletrostático Inercial Assistido por Campo Magnético (MAIECF). Nesse dispositivo, o campo elétrico tem a função de acelerar os íons para o centro do dispositivo, como nos dispositivos IECF comuns, e o campo magnético tem a função de confinar os elétrons dentro do dispositivo de forma a eliminar a sua perda. Combinando o campo magnético com o campo elétrico é possível confinar tanto os íons como os elétrons dentro do dispositivo. Ressalta-se que evitando a perda de elétrons, consegue-se além do ganho de energia, manter o plasma neutro (ou quase neutro) e evitar ocorrência de descargas elétricas entre o catodo e o anodo. Manter o plasma

neutro é importante para evitar acúmulo de carga positiva, causado pela concentração de íons, e a consequente limitação da densidade de íons e perda da capacidade de confinar íons. Evitar ocorrência de descargas elétricas é fundamental para manter a operação do dispositivo em condições de sustentar de forma controlada as reações de fusão nuclear. Dessa forma, esse novo dispositivo tem a função de eliminar duas das três principais limitações dos dispositivos IECF atuais.

[027] Um esquema simplificado do dispositivo proposto de Fusão Nuclear com Confinamento Eletrostático Inercial Assistido por Campo Magnético (MAIECF) é apresentado na **FIGURA 1**. No MAIECF a câmara de vácuo (1) tem formato cilíndrico e o catodo é uma grade cilíndrica (2). A câmera de vácuo é preenchida com um gás a baixa pressão (3). O anodo consiste na própria câmera de vácuo (1) que é aterrada. O formato dos eletrodos (catodo e anodo) são cilíndricos de forma a combinar os campos magnético e elétrico com simetria axial e radial. O campo elétrico é gerado por um potencial elétrico negativo aplicado na grade do catodo (2) que fica na parte central do dispositivo. O potencial elétrico é gerado por uma fonte elétrica de alta tensão (4). O campo elétrico (5) formado por esse arranjo de catodo (2) e anodo (1) é predominantemente radial como pode ser visto na seção radial do dispositivo, mostrada na **FIGURA 2(a)**. O campo magnético (6) é gerado por solenoides de formato cilíndrico (7) localizados no exterior do dispositivo. A corrente elétrica necessária para produzir o campo magnético é aplicada por uma fonte elétrica de alta corrente (8). O campo magnético (6) formado por esses solenoides é predominantemente axial como pode ser visto na seção transversal do dispositivo, mostrada na **FIGURA 2(b)**. A conexão elétrica de alta tensão é mantida isolada da carcaça do dispositivo (1) por um isolante elétrico (9).

[028] Ressalta-se que esse dispositivo é uma inovação em termos de fusão nuclear com confinamento do plasma, que combina campo elétrico e magnético para formar uma armadilha tanto para íons como para elétrons. Como o campo magnético serve basicamente para confinar os elétrons, ele pode ser de baixa intensidade. Assim, que os elétrons são gerados entre o catodo e o anodo, eles são acelerados pelo campo elétrico. Na medida em que ganham velocidade radial são “capturados” e confinados pelo campo magnético, ficando presos em uma trajetória circular em torno do eixo axial do dispositivo. Na **FIGURA 3** é mostrada a trajetória de um elétron dentro no dispositivo MAIECF, iniciando no ponto (10), para uma tensão elétrica aplicada no catodo de -100 kV e intensidade do campo magnético de 0,1 T. Nota-se que o elétron permanece confinado nessa trajetória até ser reabsorvido no gás nêutron por alguma reação. O campo magnético também exerce influência sobre os íons causando uma deflexão nas trajetórias radiais dos íons, ou seja, os íons adquirem um pequeno momento angular. Porém, como o campo magnético é de baixa intensidade a deflexão na trajetória dos íons é pequena. Na **FIGURA 4** é mostrada uma trajetória de um íon dentro no dispositivo MAIECF, iniciando do ponto (10), para uma tensão elétrica aplicada no catodo de -100 kV e intensidade do campo magnético de 0,2 T. Nota-se que o íon atravessa a grade do catodo inúmeras vezes até sofrer uma reação de fusão, ou se chocar com a grade do catodo, ou ainda ser eliminado por meio de alguma outra reação.

[029] Nos dispositivos IECF comuns, pelo fato dos elétrons escaparem, a taxa de ionização do gás é muito pequena, sendo de no máximo 1%. Mas mesmo com essa pequena taxa de ionização do gás, chega-se a obter densidades de íons no centro desses dispositivos de até 10^{16} íons/m^3. Como no dispositivo MAIECF os elétrons ficam confinados dentro do dispositivo, a

taxa de ionização do gás é muito maior, criando condições para se obter densidades de íons no centro do MAIECF elevadas o suficiente para manter reações de fusão de forma sustentável e obter rendimento bem maior do que é obtido atualmente.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[030] Na operação do dispositivo MAIECF é usado um gás capaz de sofrer reações de fusão nuclear, tal como, deutério e/ou trítio. A pressão inicial do gás dentro do dispositivo é baixa de forma que o dispositivo opera em condição de vácuo parcial. Uma tensão elétrica negativa de corrente contínua é aplicada no catodo gerando o campo elétrico radial e uma corrente elétrica de corrente contínua é aplicada nos solenoides gerando o campo magnético axial. O campo elétrico causa a ionização do gás gerando o plasma.

[031] Um esquema do dispositivo proposto mostrando os sistemas auxiliares é apresentado na **FIGURA 5**. Para permitir a operação do dispositivo são necessários pelo menos os seguintes componentes: câmara de vácuo (1); grade do catodo (2); gás fusionável (3); fonte elétrica de alta tensão de corrente contínua (4); solenoides cilíndricos (7); fonte elétrica de alta corrente contínua (8); isolante elétrico (9); e sistema de vácuo (11). A câmera de vácuo (1) é preenchida com gás (3) a baixa pressão. A fonte elétrica de alta tensão (4) tem a função de gerar o campo elétrico de alta intensidade. O isolante elétrico (9) serve para isolar a conexão elétrica entre a fonte de alta tensão (4) e o catodo (2) da câmera de vácuo (1).A fonte elétrica de alta corrente (8) juntamente com os solenoides (7) tem a função de gerar o campo magnético.O vácuo na câmara é mantido pelo sistema gerador de vácuo (11).

[032] A fonte de alta tensão (4) aplica um potencial elétrico negativo no catodo (2), que é formado por uma grade cilíndrica vazada. A carcaça da câmara de vácuo (1) é mantida aterrada, ou seja, com potencial elétrico nulo,

fazendo assim a função de anodo. Entre o catodo (2) e o anodo (1) é formado um campo elétrico predominantemente radial (5). Um ou mais solenoides (7) de formatos cilíndricos são colocados em volta da câmara de vácuo (1). Uma corrente elétrica aplicada nos solenoides (7) gera um campo magnético predominantemente axial (6). O campo elétrico de alta magnitude quando aplicado no gás produz a ionização do mesmo gerando um plasma composto de íons (cargas positivas) e elétrons (cargas negativas) livres. O campo elétrico faz com que os íons acelerem para o centro do dispositivo e o campo magnético confina os elétrons dentro do dispositivo. Esse arranjo de campo elétrico e magnético diminui a perda de elétrons e a consequente perda de energia, evita descargas elétricas entre o catodo e anodo, mantém o plasma neutro (ou quase neutro) e evita acúmulo de carga positiva causado por concentração de íons e consequentemente a perda de capacidade de confinamento de íons.

[033] Se o gás utilizado for deutério, ou uma mistura de deutério e trítio, as reações de fusão nuclear que ocorrem dentro do dispositivo MAIECF geram nêutrons. A combinação do campo magnético com o campo elétrico na geometria cilíndrica, como proposta nessa patente, tem o potencial de aumentar a eficiência dos dispositivos IECF em milhares de vezes, aumentando, assim, na mesma proporção a taxa de geração de nêutrons. Portanto, uma aplicação imediata do dispositivo MAIECF é como fonte de nêutrons de alta intensidade. Além disso, na medida em que o dispositivo MAIECF proposto tem geometria cilíndrica ele pode ser construído com o comprimento que se deseja. A **FIGURA 6** apresenta um esquema que mostra uma fonte linear de nêutrons de um comprimento genérico, construída a partir do dispositivo MAIECF com 7 solenoides (7). Uma fonte linear de nêutrons de alta intensidade pode ser usada para inúmeras aplicações, tais como,

transmutação de lixo nuclear, tomografia de neutros, teste de materiais, produção de radioisótopos para medicina e terapia médica por radiação de nêutrons.

[034] A originalidade desse pedido de patente apresenta-se tanto no próprio dispositivo MAIECF, que consiste na modificação dos dispositivos IECF existentes pela adição dos solenoides para gerar o campo magnético, quanto no efeito causado pela ação combinada dos campos elétrico e magnético, que juntos tem a capacidade de confinar tanto os elétrons quanto os íons. Portanto, o grande diferencial do dispositivo MAIECF, proposto nessa patente, em relação aos dispositivos IECF existentes é a sua capacidade de confinar tanto os íons quanto os elétrons. Os dispositivos IECF existentes somente são capazes de confinar os íons. Ressalta-se que a inclusão do campo magnético em um dispositivo IECF de forma a confinar os elétrons no seu interior, elimina várias limitações presentes nesses dispositivos e com isso permite que sejam alcançadas condições de operação onde reações de fusão nuclear sejam mantidas de forma sustentada com taxas de cerca de 10^4 vezes maior do que nos dispositivos IECF existentes.

REIVINDICAÇÕES

1. **DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO**, caracterizado por combinar campo elétrico e magnético, sendo capazes, em conjunto, de confinar tanto íons como elétrons dentro do dispositivo, criando um plasma em condições de manter reações de fusão de forma sustentada com taxas de cerca de 10^4 vezes maior do que os dispositivos IECF existentes, compreendendo os seguintes componentes: câmara de vácuo de formato cilíndrico (1) preenchida por um gás fusionável (3), tal como, deutério e/ou trítio, capaz de sofrer reações de fusão mantida a baixa pressão; catodo de formato cilíndrico composto por uma malha de fios metálicos (2); fonte elétrica de alta tensão de corrente contínua (4) que tem a função de gerar o campo elétrico de alta intensidade (5); fonte elétrica de alta corrente contínua (8) juntamente com um ou mais solenoides de formatos cilíndricos (7), os quais tem a função de gerar o campo magnético (6); isolante elétrico (9) que serve para isolar a conexão elétrica entre a fonte de alta tensão (4) e o catodo (2) da câmera de vácuo (1); e um sistema gerador de vácuo (11).

2. **DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela fonte elétrica de alta corrente contínua (8) aplicar uma corrente elétrica em (7), que associado com a geometria cilíndrica de (7) e de (1), forma um campo magnético predominantemente axial (6).

3. **DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO**, de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizado pela combinação de (5) com (6) ser capaz de confinar tanto íons como elétrons dentro de (1), evitando a perda de elétrons e assim: (a) evitando a perda da energia que seria levada embora com os elétrons que escapam do dispositivo; (b) evitando descargas elétricas entre o catodo e anodo; (c) mantendo o plasma neutro (ou quase neutro); e (d) evitando o acúmulo de carga positiva causado por concentração de íons e, consequentemente, a perda de capacidade de confinamento de íons.

4. **DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO**, de acordo com as reivindicações 1, 2 e 3, caracterizado por ser utilizado como uma fonte linear de nêutrons de alta intensidade, podendo ter comprimento que for necessário para adaptar-se a diferentes aplicações, tais como, transmutação de lixo nuclear, tomografia de nêutrons, teste de materiais, produção de radioisótopos para medicina e terapia médica por radiação de nêutrons.

DESENHOS

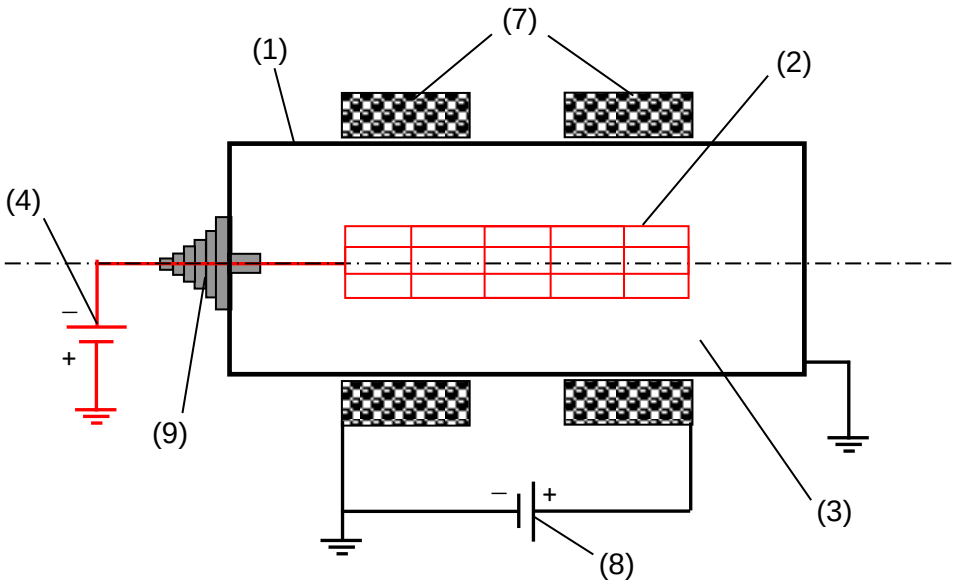
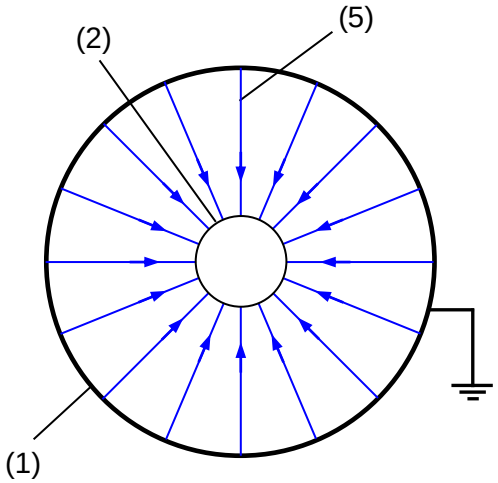
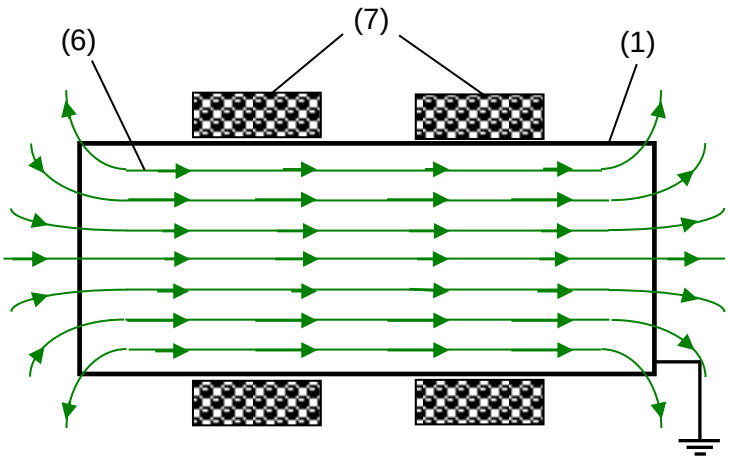


FIGURA 1



(a)



(b)

FIGURA 2

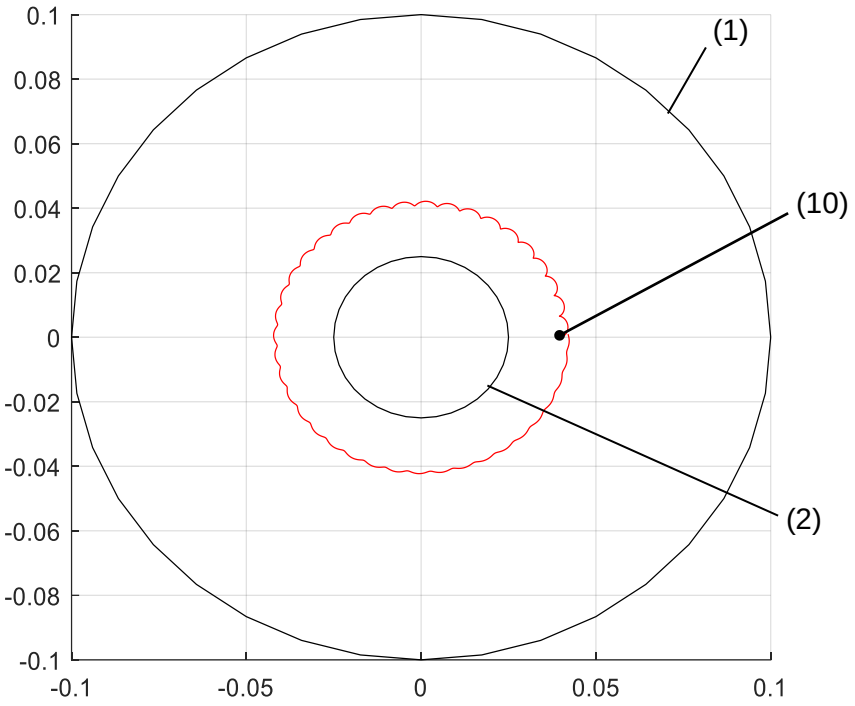


FIGURA 3

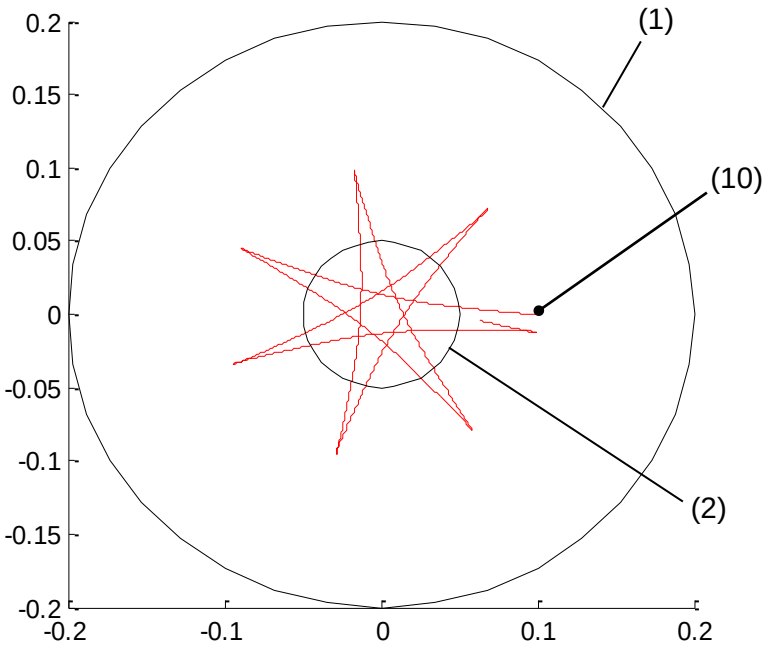


FIGURA 4

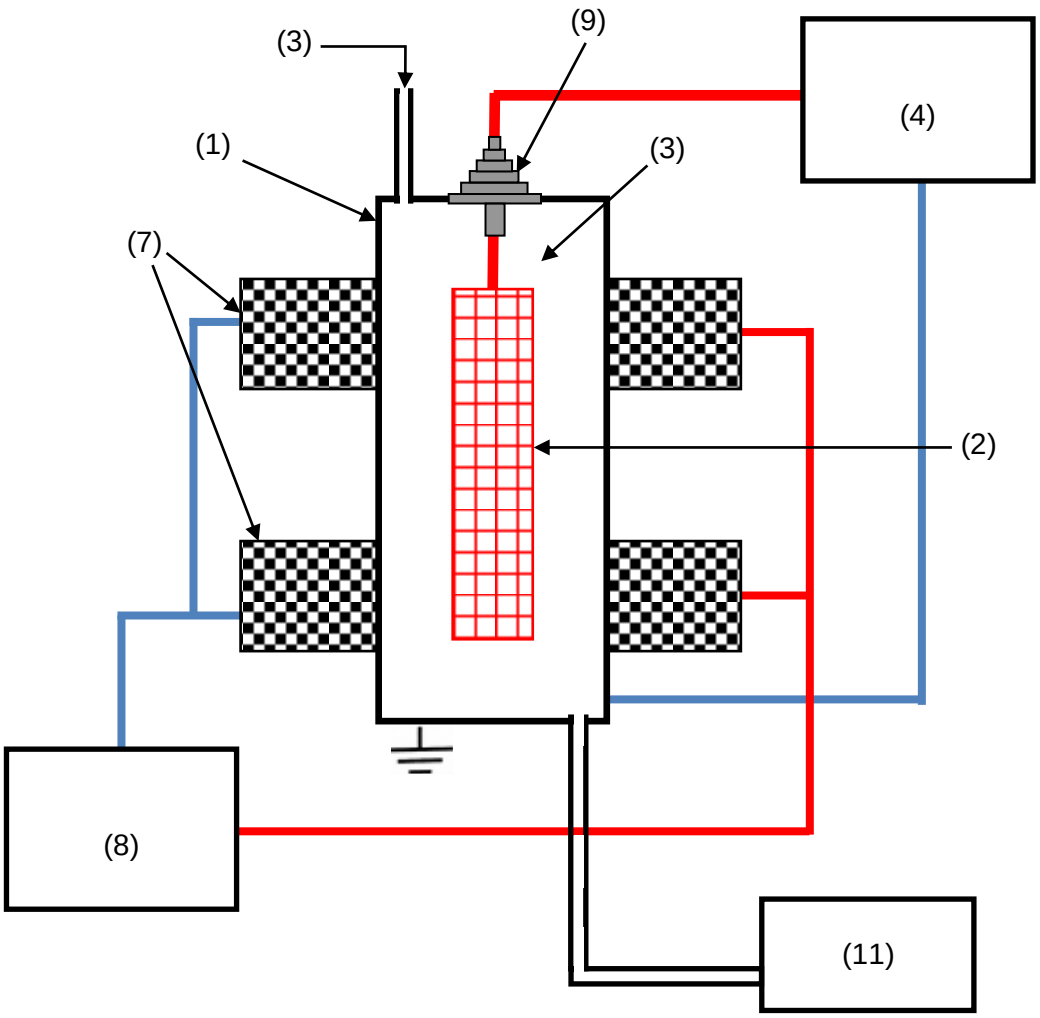


FIGURA 5

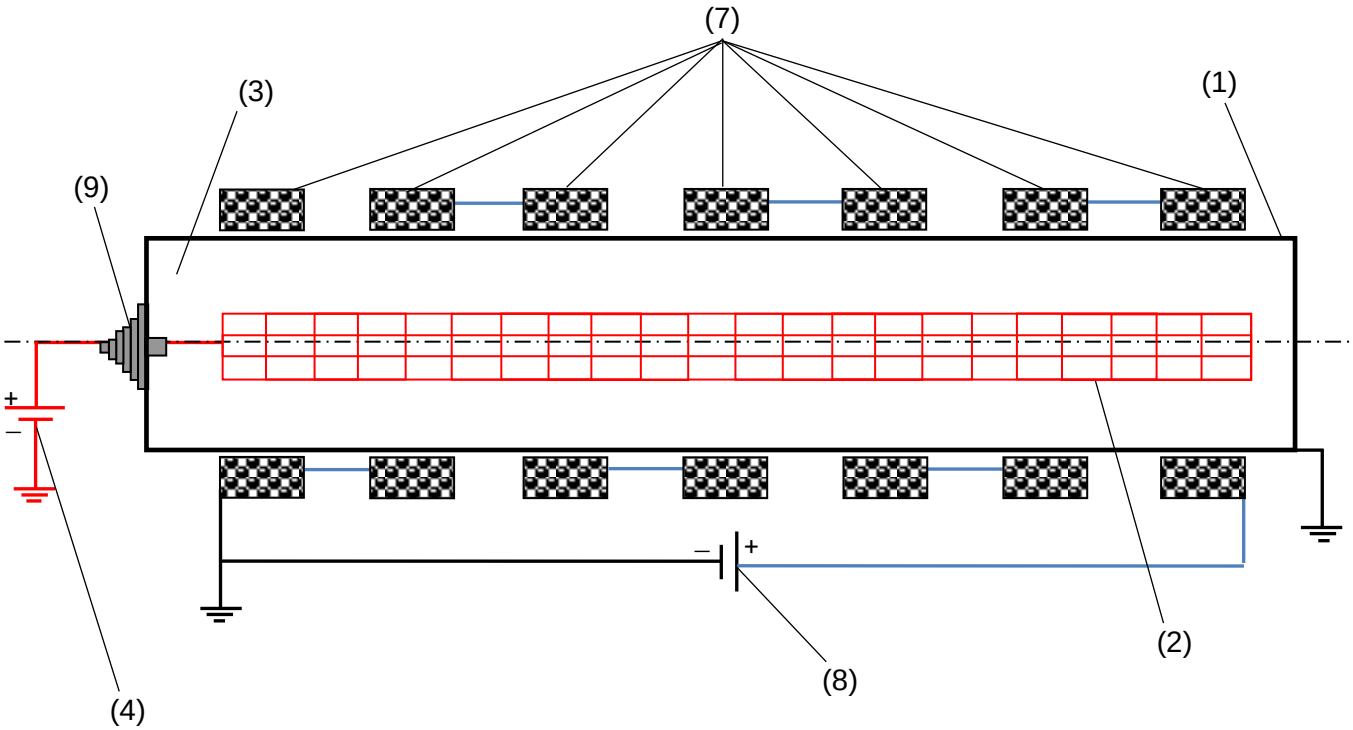


FIGURA 6

RESUMO

DISPOSITIVO DE FUSÃO NUCLEAR POR CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO

Essa patente propõe um dispositivo para Fusão Nuclear por Confinamento Eletrostático Inercial Assistido por Campo Magnético (MAIECF), cuja finalidade é minimizar a perda da capacidade de confinamento do campo elétrico dos atuais dispositivos de fusão nuclear por confinamento eletrostático inercial (IECF), usando para isso um campo magnético. Esse dispositivo é compreendido por uma câmara de vácuo de formato cilíndrico, um catodo composto por uma malha de fios metálicos, um ou mais solenóides cilíndricos, um sistema gerador de vácuo, uma fonte de alta tensão elétrica de corrente contínua, uma fonte de alta corrente elétrica contínua e um isolante elétrico. A câmara de vácuo é preenchida com um gás a baixa pressão, capaz de sofrer reações de fusão nuclear, e sua carcaça é mantida aterrada fazendo a função de anodo. O campo magnético gerado pelos solenóides posicionados em volta da câmara de vácuo confina os elétrons gerados pelo campo elétrico de alta magnitude. Evitando a perda de elétrons consegue-se: evitar a perda da energia que seria levada embora com os elétrons que escapam do dispositivo; evitar descargas elétricas entre o catodo e anodo; manter o plasma neutro (ou quase neutro); e evitar acúmulo de carga positiva causado por concentração de íons e consequentemente a perda de capacidade de confinamento de íons. Uma utilização desse dispositivo é como fonte linear de nêutrons de alta intensidade, sendo que essa fonte pode ter o comprimento que for necessário para a aplicação desejada.