
**FUSÃO NUCLEAR COM CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO
INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO**

PROPOSTA DE PROJETO

**EDITAL INTERNO - Oportunidade de Nucleação de novos Projetos de
Pesquisa – DPDE/IPEN Nº 4/2017**

Coordenador

Eduardo Lobo Lustosa Cabral

FUSÃO NUCLEAR COM CONFINAMENTO ELETROSTÁTICO INERCIAL ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO

RESUMO

Fusão nuclear com confinamento eletrostático inercial (IECF) consiste de uma forma tecnologicamente simples 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 e os íons são acelerados em direção ao centro do dispositivo, onde ocorrem as reações de fusão. Os dispositivos IECF atuais apresentam limitações que impedem o seu uso para geração de energia. As principais limitações são perda de elétrons e íons, e acúmulo de carga positiva no campo elétrico com a conseqüente perda do fosso potencial. Diversos dispositivos IECF foram propostos na tentativa de eliminar essas limitações, porém, até o momento nenhuma dessas propostas teve sucesso. Esse projeto consiste no desenvolvimento de um dispositivo para Fusão Nuclear com 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. 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 conseqüentemente a perda do fosso potencial. Além do desenvolvimento do dispositivo, também é objetivo desse projeto desenvolver um modelo de partículas para analisar a dinâmica de dispositivos de confinamento de plasma para fusão que combinam campo elétrico com campo magnético. A validação desse modelo será realizada com dados experimentais obtidos da operação do dispositivo MAIECF desenvolvido. Com a finalidade de diminuir as perdas de íons por choque no catodo, novas formas de catodos serão analisadas usando o modelo desenvolvido. Futuramente, o dispositivo MAIECF desenvolvido será utilizado para testar novas formas de catodo que diminuam, ou mesmo eliminam a perda de íons. Ressalta-se que como resultado desse projeto tem-se também a implantação de um laboratório de fusão nuclear no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares que pode ser utilizado para pesquisas inovadoras na área.

1. INTRODUÇÃO

Fusão nuclear com Confinamento Eletrostático Inercial, ou em inglês, *Inertial Electrostatic Confinement Fusion* (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, que podem ser na forma de grades ou virtuais, tipicamente em geometria esférica ou cilíndrica. Vários esquemas foram implementados (Farnsworth, 1966; Hirsh e Meeks, 1970; Bussard, 1991; Krall, 1992; Barnes et al., 1993; Nebel e Barnes, 1998; Shrestha et al., 2005; McGuire e Sedwick, 2005; Klein, 2011; Knapp, 2015), sendo que o tipo mais comum utiliza eletrodos concêntricos na forma de grades esféricas, como mostrado na Figura 1. Nesse dispositivo, o campo elétrico acelera íons em direção ao centro, onde ocorrem as reações de fusão.

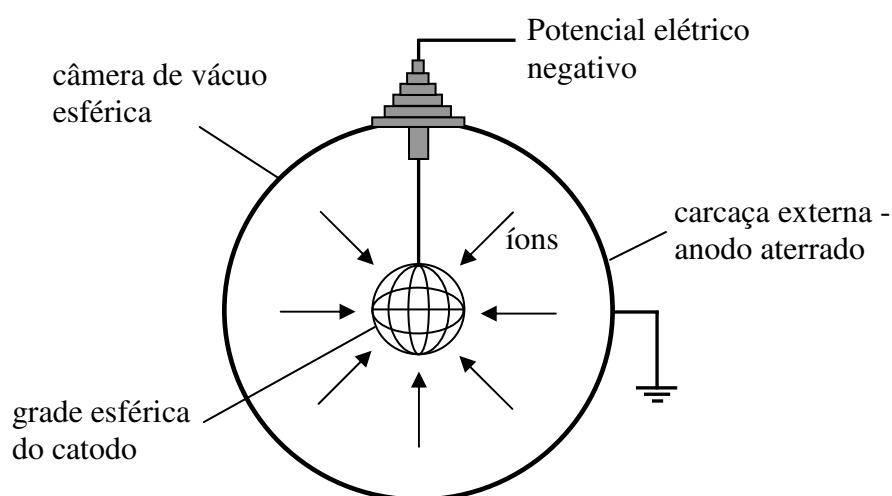


Figura 1. Diagrama esquemático de um dispositivo IECF de grades com geometria esférica, onde o eletrodo interno é o catodo.

A simplicidade tecnológica dos sistemas IECF consistiu na base de seu sucesso inicial. Na década de 1960, sistemas IECF foram capazes de gerar em regime permanente cerca de 2×10^9 nêutrons/s (Elmore et al., 1959; Farnsworth, 1966; e Hirsh, 1967).

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, 1997); Ohnishi et al., 2001; Takamatsu et al., 2005). Contudo, existem diversas aplicações comerciais que poderiam ser desenvolvidas em curto prazo para um dispositivo IECF, tais como, produção de radioisótopos, radioterapia, análise por ativação de nêutrons etc (Kulcinski et al., 2003).

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 mega-kelvin é uma temperatura muito elevada, a tensão elétrica correspondente é somente 4 kV.

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- ^3He (Subamian, 2004).

1.1. Dispositivos IECF

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.

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 (1949). Mais tarde, conceitos melhores foram propostos por Elmore et al. (1959), Farnsworth (1967) e Hirsh (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.

Hirsh (1967) conduziu os primeiros experimentos com um dispositivo IECF onde se comprovou ocorrerem reações de fusão. Nos seus experimentos Hirsh 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.

Hirsch e Meeks (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.

O Fusor de Hirsh e Meeks (1970) pode operar em diversos modos, dependendo dos gases utilizados, do potencial elétrico e da pressão interna. Por exemplo, utilizando pressões internas (da ordem de 10 a 100 mTorr) o Fusor trabalha no modo estrela (*Glow Discharge*), enquanto que com pressões internas mais baixas o Fusor opera no modo *central-spot*. As possibilidades experimentais são praticamente infinitas e modificações na máquina são fáceis de serem desenvolvidas e implementadas, como por exemplo, a utilização de várias malhas e utilização de campos magnéticos em combinação com o campo elétrico.

1.2. Desafios tecnológicos - limitações dos dispositivos IECF

Embora apresentando algumas vantagens, alguns pesquisadores, tais como, Rider (1995) e Nevins (1995), são céticos de que o conceito IECF possa ser utilizado para produção de energia, servindo somente como fonte de nêutrons. Porém, vários estudos teóricos e experimentais e novas modificações propostas recentemente nos dispositivos IEC fornecem resultados encorajadores.

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 os seguintes:

- Perda de íons por choque com o catodo devido à presença da grade;
- Termalização dos íons e dos elétrons;
- Emissão de radiação Bremsstrahlung;
- Perda de elétrons;
- Acumulação de carga elétrica no campo elétrico.

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 (Rider, 1995). Além disso, o plasma está em contato com o catodo, resultando em contaminação do plasma e degradação do eletrodo.

Segundo Nevis (1995), quando os íons chegam ao centro do dispositivo IECF têm alta energia, porém a distribuição de velocidade dos íons rapidamente alcança uma distribuição Maxwell-Boltzmann em decorrência de colisões tipo coulombiana. De acordo com Rider (1995), a termalização dos íons ocorre em questão de milisegundos e, em comparação, são necessários alguns minutos para que um íon sofra uma reação de fusão. Contudo, a termalização dos íons não é de fato um problema nos dispositivos IECF, pois se pode operar com um potencial elétrico suficientemente alto para que a energia média dos íons seja superior à energia mínima para gerar reações de fusão. Além disso, o problema de termalização dos íons não é um consenso entre os pesquisadores e alguns autores, tais como,

Rosenberg e Krall (1992) argumentam que a termalização dos íons ocorre somente na periferia do dispositivo onde os íons estão com baixa energia, sendo que na parte central devido à aceleração dos íons pelo campo elétrico eles tendem a manter uma distribuição razoavelmente monoenergética. Porém, um problema de fato causado pela termalização dos íons presentes na periferia do dispositivo é que, como consequência da termalização, alguns íons ganharão energia suficiente para ultrapassar o fosso potencial, levando consigo a sua energia sem sofrerem reação de fusão. Mas esse fenômeno ocorre em qualquer tipo de reator de fusão e não é limitante nos dispositivos IECF.

Outro problema é o efeito Bremsstrahlung, que consiste na liberação de radiação eletromagnética em razão da interação de partículas carregadas com a matéria. Rider (1995) mostra que as perdas por Bremsstrahlung são relativamente altas, mas não são proibitivas quando o combustível utilizado é deutério-trítio, deutério-deutério e possivelmente deutério- ^3He .

A maioria das discussões em IECF considera o comportamento de íons em um potencial elétrico gerado por eletrodos. Em razão de que um fosso de potencial elétrico não poder confinar simultaneamente íons e elétrons (um fosso potencial para confinamento de íons é um acelerador para elétrons), em princípio não é possível confinar um plasma neutro somente com 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.

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.

Se os elétrons escapam do dispositivo não é possível manter um plasma neutro, assim, 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 em um limite superior para a densidade dos íons e, conseqüentemente, um limite para a densidade de potência.

1.3. Conceitos alternativos de dispositivos IECF

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 apresentam idéias promissoras e são apresentados a seguir.

Com o objetivo de diminuir a perda de íons por choque com a grade do catodo central, McGuirre e Sedwick (2005 e 2008) e Dietrich et al. (2008) propuseram um dispositivo IECF com múltiplos eletrodos na forma de grades. 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 ao catodo que tem um raio maior. Esse eletrodo central funciona como um anodo que confina elétrons criando, assim, um catodo virtual no centro do dispositivo. Posteriormente, Sedwick e Hall (2012) 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. 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.

Um conceito interessante de dispositivo é a Esfera de Plasma com Oscilação Periódica (POPS). Esse conceito foi proposto por Nebel e Barnes (1998) e posteriormente confirmado experimentalmente por Park et al. (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 radiofrequência 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 elimina a perda de íons na grade do eletrodo, que é uma das principais limitações dos dispositivos IECF e não é eficiente para confinar os elétrons.

Pesquisadores da Universidade de Illinois (Shrestha et al., 2005 e Thomas et al., 2005) desenvolveram um novo conceito de IEC onde combinam o campo eletrostático com um campo magnético. 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.

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 *Polywell* (Krall, 1992; Krall et al., 1995; Carr e Khachan, 2010; Carr et al., 2011; Cornish et al., 2014) e a geometria *Penning Trap* (Barnes et al., 1993; Barnes et al., 1997; Schauer et al., 2004; Barnes, 2014).

O conceito da configuração *Polywell* é utilizar um campo magnético gerado por solenóides para confinar elétrons no centro do dispositivo formando, assim, um catodo virtual que confina os íons eletrostaticamente. Esse dispositivo consiste de um arranjo de solenóides posicionados como se estivessem nas faces de um cubo. O campo magnético formado pelos solenóides 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.

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 et al., 2000). Contudo, esse tipo de dispositivo sofre as mesmas limitações do conceito *Polywell*, ou seja, perda de elétrons e baixa densidade e energia dos íons.

Na linha de eliminar a perda de íons por choque com o catodo pela eliminação física do catodo, Klein (2011) 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. O dispositivo é inspirado na armadilha linear eletrostática de íons desenvolvida por Andersen et al. (2004) e a armadilha *anharmonic* de Ermakov e Hinch (2010). Contudo, esse tipo de armadilha não confina elétrons e, assim, o número de íons contidos nesse tipo de armadilhas 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.

Outro dispositivo IECF que não utiliza eletrodos físicos dentro do plasma é apresentado por Knapp (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 conseqüentemente 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.

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. (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 solenóides 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.

2. OBJETIVOS

Como visto na Seção 1.2, as principais limitações dos dispositivos IECF são: (1) perda de íons; (2) perda de elétrons; e (3) acúmulo de carga positiva no campo elétrico com a conseqüente perda do fosso de potencial elétrico. Diversos dispositivos IECF, conforme descrito na Seção 1.3, foram propostos na tentativa de eliminar essas limitações, porém, nenhuma dessas propostas teve sucesso em resolver todas essas limitações simultaneamente.

O objetivo deste projeto é iniciar um estudo cuja meta final é desenvolver um dispositivo de confinamento eletrostático capaz de manter reações de fusão nuclear de forma controlada e sustentável.

O dispositivo proposto neste projeto tem por base um método de Fusão Nuclear com 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. 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 conseqüente limitação da densidade de íons e perda do fosso potencial. 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 proposto nesse projeto, tem a função de eliminar duas das três principais limitações dos dispositivos IECF.

Em resumo, os objetivos que se esperam alcançar nesse projeto são os seguintes:

- Desenvolver e construir um dispositivo para fusão nuclear que combina confinamento eletrostático com confinamento magnético;
- Desenvolver um modelo de partícula para analisar a dinâmica de dispositivos de confinamento de plasma para fusão que combinam campo elétrico com campo magnético;
- Obter resultados experimentais da operação do dispositivo construído para validar o modelo de partículas desenvolvido;
- Analisar novas formas de catodos com o objetivo de diminuir (ou eliminar) a perda de íons por choque na grade do catodo.

Observa-se que as propostas para eliminar a perda de íons por choque na grade do catodo serão analisadas usando-se o modelo de partículas desenvolvido no projeto. Futuramente, espera-se usar essa mesma bancada experimental para testar novas formas de catodo que diminuam, ou mesmo eliminam a perda de íons.

3. METODOLOGIA

Nesta seção está apresentado o que será desenvolvido nesse projeto e também as contribuições na área de fusão nuclear que se espera realizar.

3.1. O dispositivo MAIECF proposto

Como mencionado, o dispositivo proposto neste projeto consiste de um método de Fusão Nuclear com Confinamento Eletrostático Inercial Assistido por Campo Magnético (MAIECF). Na Figura 2 é apresentado um esquema simplificado do dispositivo.

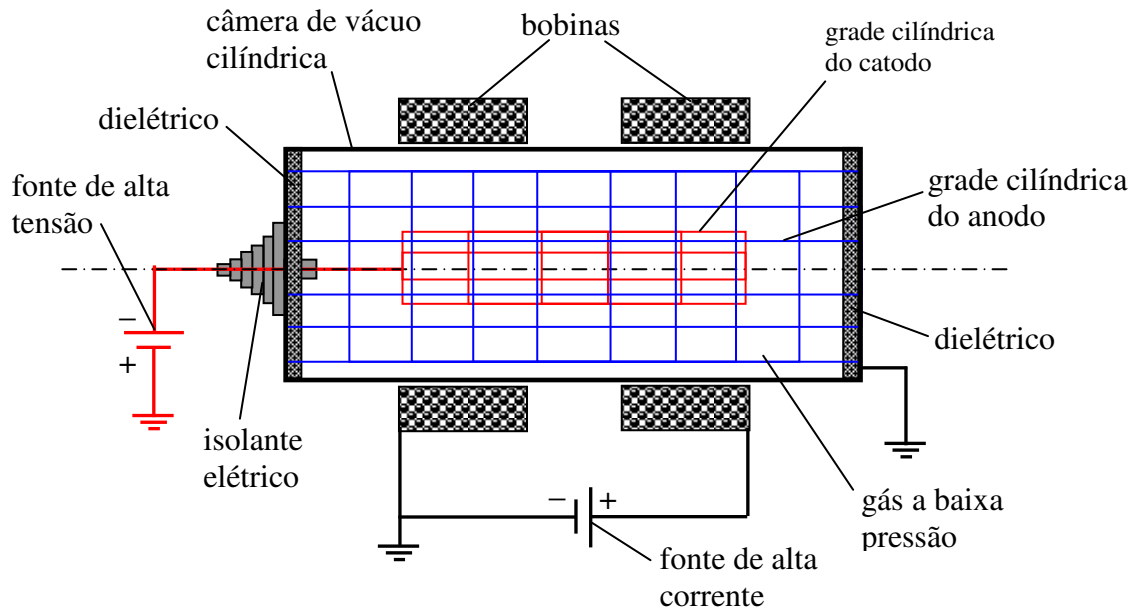


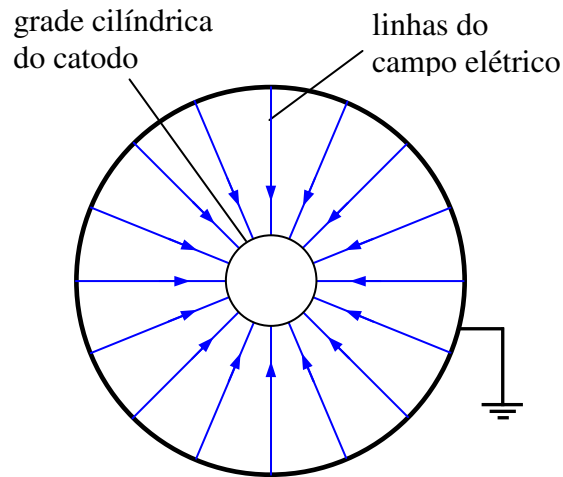
Figura 2. Esquema simplificado do dispositivo MAIECF

O formato dos eletrodos (catodo e anodo) do dispositivo são cilíndricos de forma a combinar os campos magnético e elétrico com simetria radial e axial. O campo elétrico é gerado por um potencial elétrico negativo aplicado na grade do catodo que fica na parte central do dispositivo. Para permitir testes com diferentes potenciais essa tensão elétrica deve ser variável. O anodo, que é aterrado, consiste na grade externa que fica próxima à carcaça do dispositivo. O campo elétrico formado por esse arranjo catodo-anodo é radial como mostrado na Figura 3(a). O campo magnético é gerado por duas bobinas elétricas localizadas no exterior do dispositivo. Da mesma forma que no caso do campo elétrico, para permitir testes com diferentes campos magnéticos, a corrente elétrica que passa pelas bobinas deve ser variável. O campo magnético formado por essas bobinas é axial como mostrado na Figura 3(b).

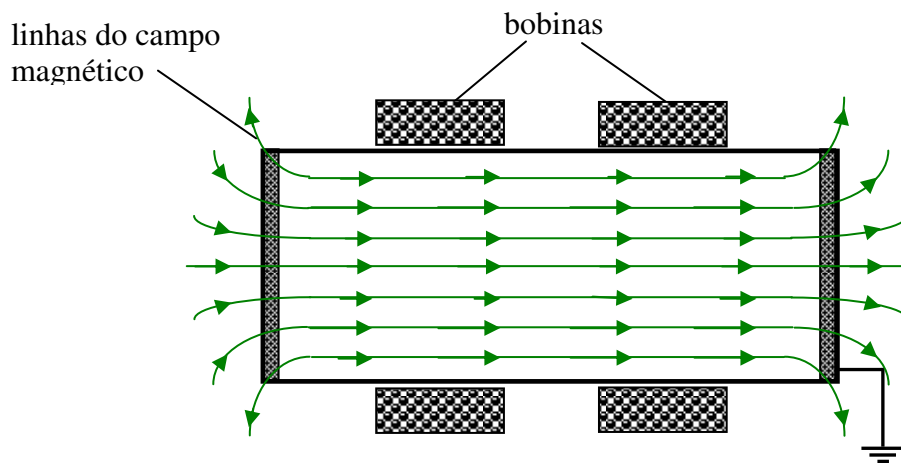
Da mesma forma que nos dispositivos IECF comuns, o campo elétrico tem a função de confinar os íons e de acelerá-los para o centro do dispositivo. A inclusão do campo magnético no dispositivo tem por objetivo confinar os elétrons de forma a eliminar a sua perda.

Combinando o campo magnético com o campo elétrico é possível confinar tanto os íons como os elétrons dentro do dispositivo.

Nota-se que evitando a perda de elétrons, consegue-se, além do ganho de energia e de evitar ocorrência de descargas elétricas entre catodo e anodo, manter a neutralidade do plasma e, assim, evitar acúmulo de carga positiva causado pela concentração de íons em regiões onde o potencial elétrico é mais negativo. Nota-se que uma concentração de carga positiva em uma região do dispositivo tende a diminuir o campo elétrico e conseqüentemente a perda do fosso potencial.



(a) Seção radial do dispositivo mostrando o campo elétrico radial



(b) Seção transversal do dispositivo mostrando o campo magnético axial

Figura 3. Esquema do dispositivo MAIECF mostrando os campos elétrico (a) e magnético (b).

Na medida em que a grade do catodo central do dispositivo tem um comprimento finito, as regiões laterais do dispositivo, entre o término do catodo e a carcaça, seriam regiões de fuga de elétrons com possibilidade de ocorrência de descargas elétricas. Os dois dielétricos, feitos de material cerâmico, colocados nas laterais do dispositivo têm a função de minimizar a perda de elétrons por essas áreas. Os dielétricos alteram o campo elétrico nessas regiões de forma que as suas linhas de campo são redirecionadas para a parte cilíndrica do anodo. Dessa forma, um elétron entre o catodo e a lateral do dispositivo terá uma componente radial de velocidade gerada pelo campo elétrico e com isso o campo magnético gerará uma componente tangencial de velocidade, fazendo com que um elétron nessas regiões também fique confinado dentro do dispositivo.

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 “pegos” pelo campo magnético e ficam presos em uma trajetória circular em torno do eixo axial do dispositivo. 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 Seção 3.3 são apresentados cálculos preliminares da trajetória dos íons e elétrons no dispositivo proposto, que mostram a capacidade do dispositivo de confinar tanto íons como elétrons.

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^{20} íons/m³. Como no dispositivo MAIECF os elétrons ficam confinados dentro do dispositivo, espera-se que ocorra ionização total do gás e, assim, sejam criadas 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.

3.2. Aspectos funcionais do dispositivo MAIECF proposto

Na operação do dispositivo MAIECF será usado gás deutério. A pressão inicial do gás dentro do dispositivo é baixa, sendo da ordem de 1 Torr a 0,01 Torr absoluto, ou seja, o dispositivo opera em condição de vácuo parcial. Uma tensão elétrica negativa é aplicada no catodo gerando o campo elétrico radial e uma corrente elétrica é aplicada nas bobinas gerando o campo magnético axial. Os elétrons emitidos pelo catodo causam a ionização do gás gerando o plasma.

Um esquema do dispositivo proposto mostrando os sistemas auxiliares é apresentado na Figura 4. As dimensões internas da carcaça do dispositivo será de cerca de 0,4 m de diâmetro e 1,0 m de comprimento.

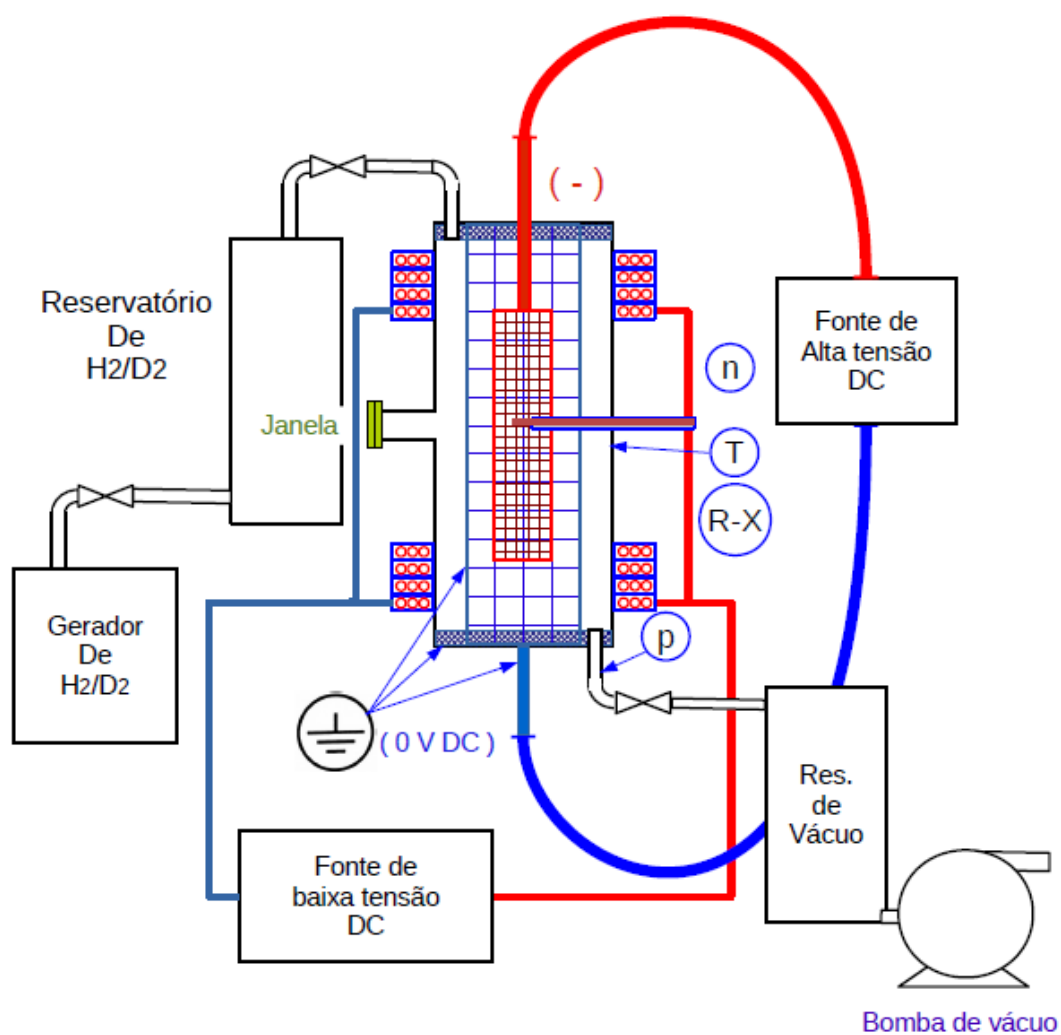


Figura 4. Esquema do dispositivo MAIECF proposto com os sistemas auxiliares.

Para permitir a operação do dispositivo são necessários os seguintes equipamentos e sistemas:

- Fonte elétrica de alta tensão e baixa corrente;
- Fonte elétrica de baixa tensão a alta corrente;
- Bomba de vácuo;
- Sistema de geração e injeção do gás deutério;
- Instrumentação;
- Blindagem de radiação.

A fonte elétrica de alta tensão e baixa corrente tem a função de gerar o campo elétrico de alta intensidade. O desejado é uma fonte de tensão variável entre 0 a -100 kV. Como a perda de elétrons no dispositivo é pequena, então, a capacidade de corrente dessa fonte é pequena, sendo da ordem de no máximo 15 mA.

A fonte elétrica de baixa tensão e alta corrente juntamente com as bobinas têm a função de gerar o campo magnético. Deseja-se operar com campos magnéticos variáveis de 0 a 0,3 T, dessa forma, estima-se que a corrente máxima da fonte é de no máximo 500 A. Como a resistência elétrica das bobinas é baixa, a tensão máxima esperada dessa fonte é de 30 V. Dessa forma, é necessária uma fonte elétrica de baixa tensão e alta corrente.

Em razão do dispositivo operar com pressões abaixo da pressão atmosférica, é necessária uma bomba de vácuo. A bomba de vácuo deve ser capaz de gerar um vácuo maior do que o de operação, pelo fato de que é necessário que o deutério dentro do dispositivo tenha alta pureza. Dessa forma, antes de iniciar a operação do dispositivo ele é totalmente evacuado e após essa operação o gás deutério é injetado com a pressão desejada. Para realizar a evacuação completa do dispositivo para remoção de impurezas é necessária uma bomba de vácuo com capacidade de cerca de 10^{-3} mTorr.

Em razão da necessidade de se operar o dispositivo com gás deutério altamente puro, aliado à dificuldade de adquirir esse tipo de gás, a solução é utilizar um sistema de geração do gás deutério a partir de um sistema de membranas, PEM (Proton Exchange Membrane), utilizando água leve quando se quiser produzir H₂, ou água pesada para produzir deutério.

A instrumentação necessária para monitorar a operação do dispositivo e para obter os dados experimentais para avaliar o funcionamento do mesmo e permitir a validação do modelo de partículas é composta de um sistema de aquisição de dados e pelos seguintes instrumentos:

- Sensores de pressão;
- Sensores de temperatura;
- Detector de nêutrons;
- Detectores de raios gama;
- Sensor de campo magnético;
- Sonda Langmuir;
- Câmera para observar o plasma.

Nota-se que a sonda Langmuir serve para medir o potencial elétrico, a densidade e a temperatura dos elétrons e íons.

Na medida em que durante a operação do dispositivo é emitida radiação na forma de raios gama e nêutrons, é necessária uma blindagem dessa radiação. O dimensionamento dessa blindagem faz parte do projeto do dispositivo.

3.3. Modelo de partículas

Para simular a operação do dispositivo MAIECF será desenvolvido um modelo para calcular o transporte dos íons e elétrons em geometria tridimensional baseado no movimento de cada partícula. Ressalta-se que existem diversos softwares que realizam transporte de partículas carregadas, tais como, MCNPX, PENELOPE e GEANT4. Contudo, nenhum deles está preparado para transporte de elétrons e íons com baixa energia (da ordem de elétron-volts) na presença de campos elétricos e magnéticos. A presença de íons com energia baixa ocorre porque os íons recirculam em torno do centro do dispositivo, assim, quando eles estão se movendo para a periferia do dispositivo são desacelerados até pararem e invertem o seu movimento e se dirigem novamente para o centro do dispositivo. Na inversão do movimento os íons ficam com energia praticamente nula. A presença de elétrons com energia baixa ocorre na região interna do catodo no centro do dispositivo. Nessa região o campo elétrico é baixo e com isso os elétrons gerados nessa região, pela ionização do gás pelos íons, ficam confinados com energia muito baixa.

O modelo que será desenvolvido segue o método utilizado por Nguyen-Troung (2015) para simular transporte de elétrons. Esse método combina o cálculo da perda de energia pela interação das partículas carregadas (íons e elétrons) com o gás neutro usando um modelo de “*stopping power*”, tipo Fórmula de Bethe, com o método de Monte Carlo. O método de Monte Carlo é utilizado para determinar os desvios nas trajetórias das partículas por choques elásticos com moléculas do gás neutro, com íons e com elétrons.

No caso do dispositivo MAIECF os íons e elétrons sofrem efeitos de forças provenientes do campo elétrico, do campo magnético e da interação com o gás parcialmente ionizado e com outros íons e elétrons. O movimento de uma partícula com carga elétrica q em um gás parcialmente ionizado sob a influência de um campo elétrico (\mathbf{E}) e de um campo magnético (\mathbf{B}) é dada por:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \mathbf{F}_p \quad (1)$$

onde \mathbf{p} é vetor quantidade de movimento da partícula, \mathbf{E} é o vetor campo elétrico, \mathbf{B} é o vetor campo magnético e \mathbf{F}_p é a força exercida na partícula pela interação com o gás parcialmente ionizado. A força \mathbf{F}_p é calculada usando um modelo de “*stopping power*”.

Assume-se que a partícula se move no gás parcialmente ionizado e perde energia continuamente ao longo de sua trajetória de acordo com a eq. (1). Contudo, em função de colisões elásticas com outras partículas ela tem sua trajetória modificada em função das condições do choque. Dessa forma, a trajetória de uma partícula é determinada pela repetição dos seguintes passos: (1) cálculo da distância percorrida entre dois choques elásticos; (2) cálculo da energia da partícula ao final dessa distância; e (3) cálculo do ângulo de espalhamento no choque elástico. O cálculo do ângulo de espalhamento é realizado usando o método de Monte Carlo e a respectiva seção de choque elástico.

Inicialmente, numa primeira versão do modelo será considerado que no dispositivo existem somente os elétrons e uma única espécie de íons. Essa hipótese simplifica muito o modelo e é baseada nos resultados de Osawa et al (2003), que simularam as condições de descarga elétrica em um dispositivo IECF com gás deutério e verificaram que cerca de 80% dos íons presentes são D_2^+ . Ressalta-se que essa simplificação é conservativa porque ao assumir que existe somente uma única espécie de íons, a quantidade de íons previstos é menor do que a que realmente existe, assim, a taxa de reações de fusão calculada pelo modelo será um pouco menor do que a real. Posteriormente, espera-se incluir os outros íons que são gerados no processo de ionização da molécula de gás deutério, que são D^+ e D_3^+ .

Alguns fenômenos que estão implícitos dentro da força \mathbf{F}_p e outros que não são considerados nos termos da equação (1) são importantes de serem determinados isoladamente durante a interação das partículas com o gás parcialmente ionizado. Esses fenômenos estão associados com a perda e geração de íons e elétrons, e com desvios das partículas da trajetória imposta pelos campos elétrico e magnético. Os fenômenos isolados cuja necessidade de incorporar ao modelo, que ocorrem tanto para elétrons como para os íons são os seguintes:

- Geração de íons e elétrons pela ionização do gás neutro;
- Choque com superfícies sólidas, tais como, catodo e anodo;
- Recombinação íon-elétron.

Para os íons ainda devem ser considerados os seguintes fenômenos:

- Troca de carga com moléculas de gás neutro;
- Choque elástico com moléculas de gás neutro;
- Choque elástico com outros íons;
- Dissociação do íon por meio de choque com moléculas do gás neutro;
- Fusão nuclear.

Para os elétrons ainda devem ser considerados os seguintes fenômenos:

- Choque elástico com moléculas de gás neutro;
- Choque elástico com outros elétrons;
- Incorporação do elétron por moléculas de gás neutro (*electron attachment*).

Observa-se que esses fenômenos são importantes de serem considerados isoladamente para permitir calcular a evolução da distribuição de densidade de íons no dispositivo e, assim, obter uma descrição da operação do dispositivo mais próxima da realidade.

A quantidade de íons e elétrons presente em um dispositivo IECF é muito alta, sendo da ordem de 10^{20} para pressões do gás deutério de 0,1 Torr. Dessa forma, é impossível calcular e acompanhar a trajetória de cada uma dessas partículas individualmente. Assim, para permitir a simulação da operação do MAIECF é necessário realizar um processo de agrupamento (*resampling*) onde cada partícula simulada representa de fato um conjunto de íons ou de elétrons. No processo de agrupamento, na medida em que partículas são geradas pela ionização do gás e o seu número aumenta, elas vão sendo agrupadas. O agrupamento de partículas é realizado somente para partículas que estão “próximas” uma das outras e que possuam energia e direção de movimento semelhantes. Esse processo de agrupamento é comum de ser realizado quando se usa modelos de partículas para simular eventos onde ocorre uma ionização rápida de gases, tais como, detectores de radiação e descargas elétricas. O método de agrupamento que será utilizado no modelo segue o apresentado por Kunhardt e Tzeng (1986), que também é utilizado por diversos outros pesquisadores, tal como, Moss et al. (2006).

Para uma representação mais realística da operação do dispositivo MAIECF, o aumento da temperatura do gás neutro deve ser considerado. Energia é transferida para as moléculas do gás neutro principalmente pelo choque elástico dessas moléculas com os íons. A distribuição de temperatura do gás será calculada usando o método descrito por Bogaerts e Gijbels (2000).

Nesse método, a equação de condução de calor aplicada para o gás neutro é utilizada com um termo fonte de calor que representa o aquecimento do gás por meio do choque com os íons.

Uma versão inicial do modelo já foi desenvolvida. Essa versão calcula a trajetória de íons D_2^+ e elétrons em um gás parcialmente ionizado de acordo com a equação (1) e inclui somente os fenômenos isolados de geração de íons e elétrons por ionização do gás neutro e de fusão nuclear. Utilizando essa versão inicial do modelo, foram realizadas simulações das trajetórias de elétrons e íons no dispositivo MAIECF.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas as trajetórias de um elétron no dispositivo MAIECF com o gás deutério a uma pressão absoluta de 0,5 Torr, com uma tensão aplicada no catodo de -100 kV e para intensidades de campos magnéticos de 0,1 T (Figura 5) e 0,2 T (Figura 6). Nessas simulações assume-se que os elétrons são gerados na seção axial central do dispositivo e em uma posição radial de 0,1 m. Observa-se que nos dois casos a trajetória do elétron é uma espiral com raio crescente e que quanto maior o campo magnético mais lento é o aumento do raio da espiral. Com o campo magnético de 0,1 T o elétron demora cerca de 3,3 micro-segundos para atingir o anodo (sair do dispositivo) e com o campo magnético de 0,2 T demora cerca de 25 micro-segundos. Ou seja, conforme esperado, quanto maior o campo magnético maior é o tempo de residência do elétron dentro do dispositivo. Para fornecer uma idéia melhor do efeito do campo magnético, sem o campo magnético o elétron sai do dispositivo em cerca de 1,5 nano-segundo, portanto, o uso do campo magnético com intensidade de 0,1 T aumenta o tempo de residência do elétron dentro do dispositivo em 2200 vezes e o campo magnético de 0,2 T em 16.700 vezes. Obviamente, esses resultados são preliminares em razão das simplificações do modelo usado, porém, pode-se concluir que esses resultados demonstram que um pequeno campo magnético é suficiente para confinar o elétron dentro do dispositivo por um tempo suficiente para diminuir a ocorrência de descargas elétricas no plasma.

Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as trajetórias de um íon no dispositivo MAIECF para as mesmas condições de simulação dos elétrons, ou seja, com o gás deutério a uma pressão absoluta de 0,5 Torr, com uma tensão aplicada no catodo de -100 kV e para intensidades de campos magnéticos de: 0,1 T (Figura 7) e 0,2 T (Figura 8). Nessas simulações assume-se também que os íons são gerados na seção axial central do dispositivo e em uma posição radial de 0,1 m. Observa-se que os íons ficam confinados dentro do dispositivo em uma trajetória oscilante em torno do centro do dispositivo com uma pequena deflexão. Como nesse modelo

simplificado não é considerado choque elástico entre íons, essa deflexão é causada somente pelo campo magnético. Diferentemente do caso dos elétrons, os íons ficam confinados dentro do dispositivo até serem perdidos por choque com a grade do catodo, ou por outros meios, tais como, recombinação com elétron, troca de carga elétrica etc. O tempo da simulação apresentada na Figura 7 é de 2,6 micro-segundos e o da Figura 8 é de 1,5 micro-segundos. Observa-se que quanto maior a intensidade do campo magnético maior é a deflexão na trajetória dos íons.

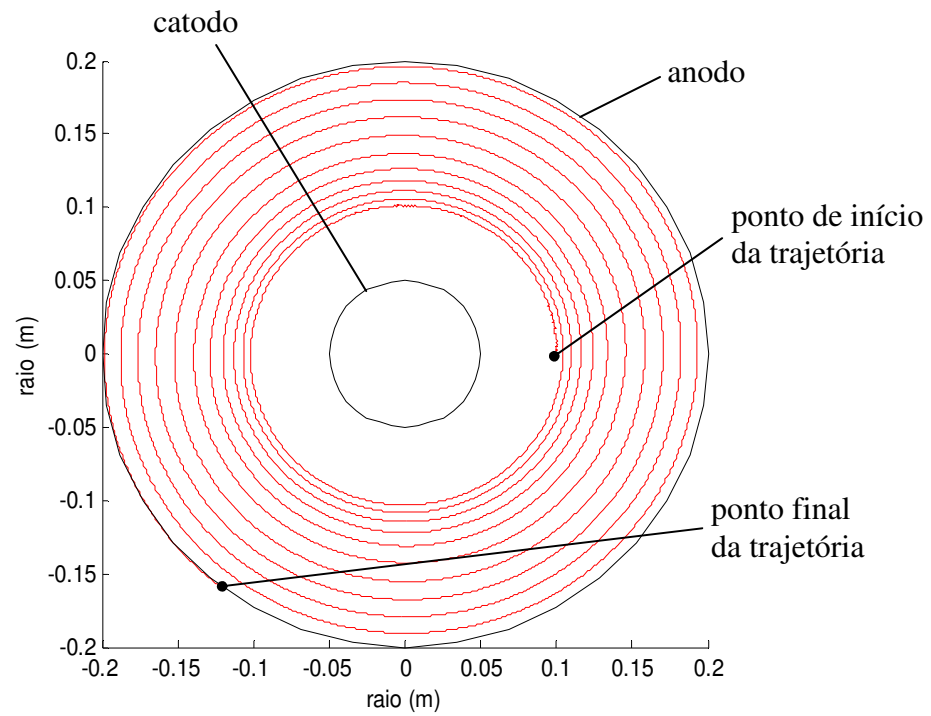


Figura 5. Trajetória de um elétron no dispositivo MAIECF, para pressão do gás de 0,5 Torr, tensão elétrica aplicada no catodo de -100 kV e intensidade do campo magnético de 0,1 T.

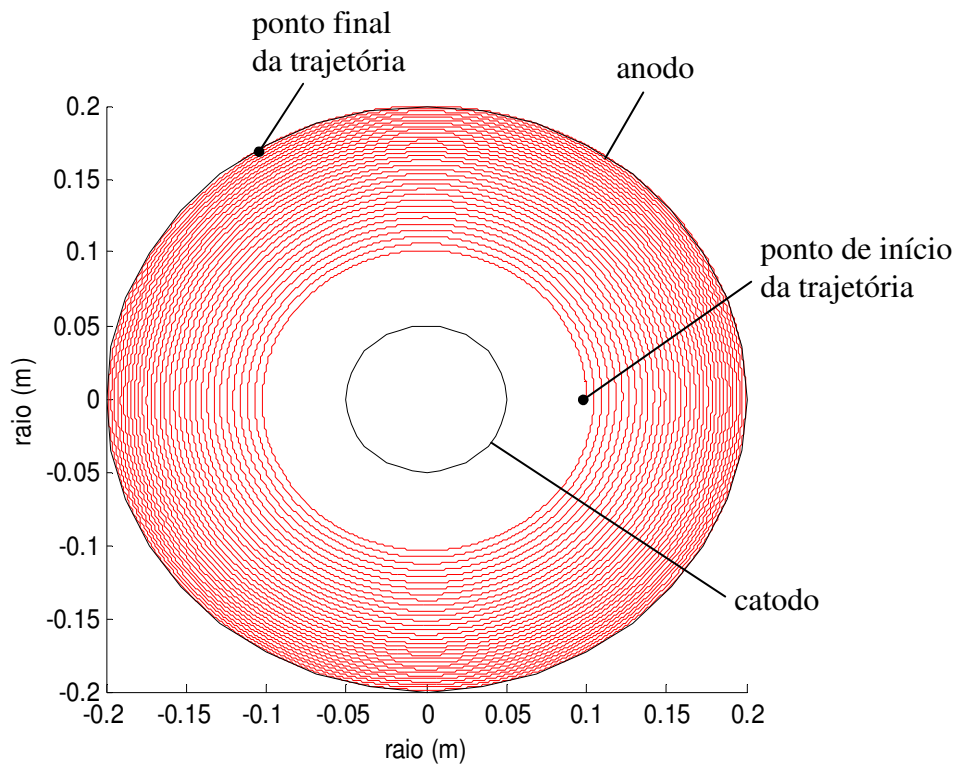


Figura 6. Trajetória de um elétron no dispositivo MAIECF, para pressão do gás de 0,5 Torr, tensão elétrica aplicada no catodo de -100 kV e intensidade do campo magnético de 0,2 T.

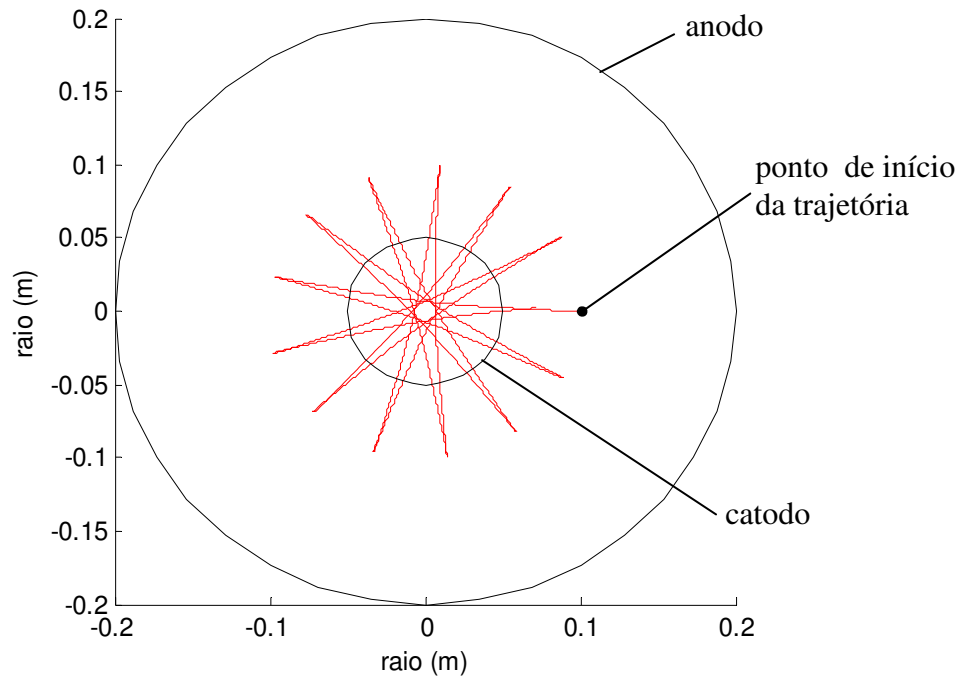


Figura 7. Trajetória de um íon no dispositivo MAIECF, para pressão do gás de 0,5 Torr, tensão elétrica aplicada no catodo de -100 kV e intensidade do campo magnético de 0,1 T.

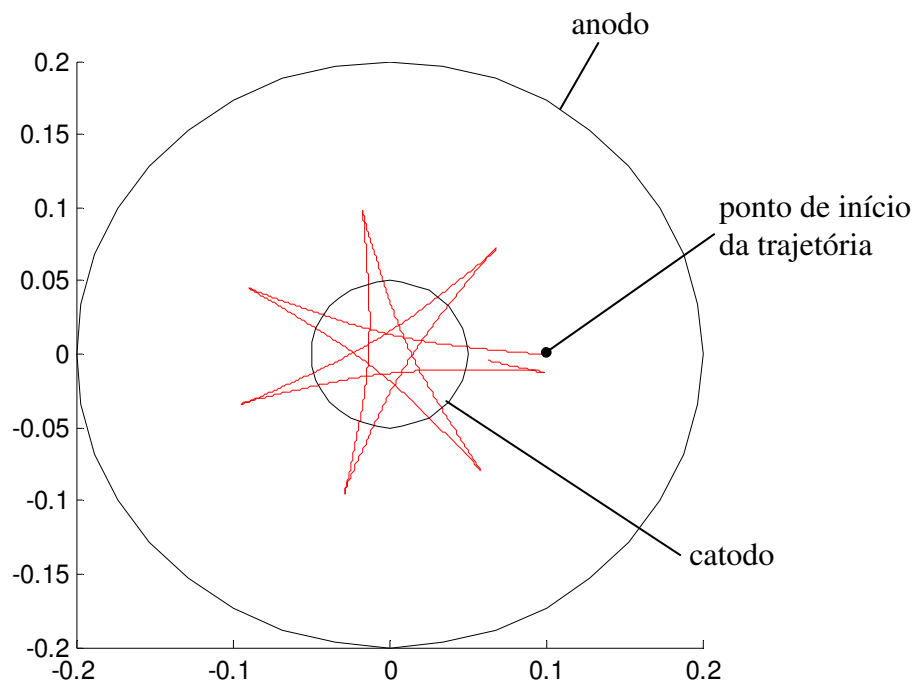


Figura 8. Trajetória de um íon no dispositivo MAIECF, para pressão do gás de 0,5 Torr, tensão elétrica aplicada no catodo de -100 kV e intensidade do campo magnético de 0,2 T.

3.4. Análise de novas formas de catodo

A análise de novas formas de catodo, com o objetivo de diminuir a perda de íons por choque no catodo, será realizada inicialmente por meio de simulação do novo dispositivo MAIECF com o modelo de partículas desenvolvido.

Por eliminar completamente o catodo no centro do dispositivo, a geometria planar proposta por Knapp (2015), conforme descrito na Seção 1.3, é muito eficiente para diminuir a perda de íons por choque no catodo, contudo esse conceito apresenta a deficiência de não confinar os elétrons. Dessa forma, unir o conceito da geometria planar com o campo magnético, que evita a perda de elétrons, pode apresentar resultados significativos em termos de aumento das reações de fusão e, portanto, pode ser a solução para tornar viável o dispositivo MAIECF em termos de obter fusão nuclear controlada e sustentável.

O mesmo raciocínio anterior é válido para o conceito de múltiplas grades catódicas, proposto por McGuire e Sedwick (2005 e 2008). Como mencionado na Seção 1.3, a presença de múltiplas grades cria um feixe de íons que evita choque dos mesmos nas grades dos eletrodos e com isso diminui consideravelmente a perda de íons. Mas, da mesma forma, que na geometria planar a presença de múltiplas grades não é capaz de confinar os elétrons. Assim, combinar múltiplas grades catódicas com o campo magnético do dispositivo MAIECF proposto pode ser também uma forma de tornar viável a obtenção de fusão nuclear controlada e sustentável.

A combinação desses dois conceitos (múltiplas grades e geometria planar) com o campo magnético será analisada inicialmente por meio de simulações do dispositivo MAIECF com o modelo de partículas desenvolvido. Se os resultados das simulações forem satisfatórios, então futuramente as modificações necessárias serão realizadas no dispositivo e novos testes experimentais serão realizados para comprovar os resultados teóricos. Ressalta-se, contudo, que por questão de prazo esses novos experimentos não fazem parte da proposta desse projeto.

O campo elétrico perto dos eletrodos em forma de grade, no caso das múltiplas grades, e em forma de anel no caso da geometria planar, varia em função da posição radial, tangencial e axial. Assim, como o choque de íons com o catodo é resultado da variação local dos campos elétrico e magnético e da energia dos íons, essa variação local dos campos tem que ser

considerada nas simulações para se ter um resultado próximo da realidade. Portanto, em todas essas análises será necessário calcular o campo elétrico e magnético com precisão em geometria tridimensional e para isso, espera-se usar um software de CAD/CAE.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Além de alcançar os objetivos propostos, os resultados esperados desse projeto são os seguintes:

- Implantação de um laboratório de fusão nuclear no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares que pode ser utilizado para pesquisas inovadoras na área;
- Comprovação teórica e experimental de que a associação de campo elétrico com campo magnético na geometria proposta do dispositivo MAIECF é capaz de confinar um plasma em condições de gerar reações de fusão de forma sustentável;
- Desenvolvimento de um modelo de partícula para analisar a dinâmica de dispositivos de confinamento de plasma para fusão que combinam campo elétrico com campo magnético;
- Desenvolvimento de pesquisa inovadora na área de fusão nuclear para fins de produção de energia;
- Formação de alunos de pós-graduação em nível de mestrado e doutorado na área de fusão nuclear;
- Publicações de trabalhos em periódicos nacionais e internacionais e em conferências técnicas nacionais e internacionais.

5. CRONOGRAMA

O desenvolvimento do projeto é dividido nas seguintes etapas:

1. Projeto mecânico e elétrico do dispositivo;
2. Dimensionamento da blindagem de radiação;
3. Especificação e aquisição de materiais e equipamentos;
4. Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados;
5. Fabricação e montagem do dispositivo MAIECF, blindagem e demais sistemas;

6. Testes preliminares de funcionamento do dispositivo;
7. Obtenção de resultados experimentais;
8. Desenvolvimento do modelo de partículas;
9. Validação do modelo de partículas;
10. Análise de novas formas de catodo para diminuir perda de íons.

A Tabela 1 apresenta o cronograma tentativo proposto para o desenvolvimento do projeto segundo as etapas definidas.

Tabela 1. Cronograma proposto para o desenvolvimento do projeto.

N.	Etapa	Meses*																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Projeto mecânico e elétrico do dispositivo	█	█	█	█	█	█	█	█																
2	Dimensionamento da blindagem de radiação				█	█	█	█	█																
3	Especificação e aquisição de materiais e equipamentos						█	█	█	█	█	█	█												
4	Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados										█	█	█	█	█	█	█								
5	Fabricação e montagem do dispositivo MAIECF, blindagem etc									█	█	█	█	█	█	█	█								
6	Testes preliminares de funcionamento do dispositivo															█	█	█	█	█					
7	Obtenção de resultados experimentais																				█	█	█	█	█
8	Desenvolvimento do modelo de partículas	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
9	Validação do modelo de partículas																					█	█	█	█
10	Análise de novas formas de catodo para diminuir perda de íons																						█	█	█

(*) Meses estão numerados de acordo com o início do projeto.

6. EQUIPE

Inicialmente a equipe do projeto é composta pelos seguintes pesquisadores:

- **Eduardo Lobo Lustosa Cabral (CEN) – Coordenador do projeto.** Engenheiro Mecânico pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1982, Mestre em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares em 1985 e Doutor em Engenharia Nuclear pelo Massachusetts Institute of Technology em 1989. Pesquisador titular do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP.
- **Benedito Dias Baptista Filho (CEN).** Engenheiro Mecânico pelo Centro Universitário da FEI em 1977, Mestre e Doutor em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo em 1979 e 1998 respectivamente. Tecnologista sênior do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP.
- **Carlos Antonio Franca Sartori (SRC).** Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, obtidos respectivamente nos anos de 1983, 1994 e 1999. Tecnologista sênior do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP.
- **José Roberto Cardoso (Escola Politécnica da USP).** Engenheiro Eletricista pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1974, Mestre, Doutor e Livre Docente em Engenharia Elétrica também pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, obtidos respectivamente em 1979, 1986 e 1993. Professor titular da Escola Politécnica da USP (EPUSP), coordenador do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LMAG) e exerceu a diretoria da EPUSP no período 2010 a 2014.
- **Maira Goes Nunes (CEN).** Bacharel em Física pela Universidade de São Paulo em 2004, Mestre e Doutora em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo em 2008 e 2012 respectivamente.
- **Mario Olimpio De Menezes (CRPQ).** Bacharel em Física pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo em 1989, Mestre e Doutor em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo em 1994 e 2000 respectivamente. Pesquisador titular do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP.
- **Orlando Nogueira da Silva (CEN).** Projetista mecânico. Técnico do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP.

- **Samuel Carracioli Santos (CEN)**. Técnico em eletrônica nuclear. Técnico do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP.

Além desses pesquisadores, espera-se que durante o desenvolvimento do projeto outros pesquisadores passem a contribuir para o projeto, incluindo o Dr. Leonid Ruchko, outros pesquisadores do IPEN e alunos de iniciação científica e de pós-graduação. É importante ressaltar que o **Dr. Leonid Ruchko** é especialista em fusão nuclear e irá trabalhar nesse projeto após a sua aposentadoria, já solicitada, ao Instituto de Física da USP,.

7. ORÇAMENTO E JUSTIFICATIVAS

Como visto na Seção 3.2, para permitir a operação do dispositivo são necessários os seguintes equipamentos:

- Fonte elétrica de alta tensão e baixa corrente;
- Fonte elétrica de baixa tensão a alta corrente;
- Bomba de vácuo;
- Sistema de geração de gás hidrogênio/deutério;
- Sonda Langmuir;
- Válvulas;
- Sistema de aquisição de dados;
- Sensores de pressão;
- Detectores de radiação.

Além desses equipamentos são também necessários materiais de consumo mecânico e elétrico, e serviços de terceiros para a fabricação e montagem do dispositivo e da blindagem. Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 são apresentados respectivamente os orçamentos de equipamentos permanentes adquiridos no mercado nacional, de material de consumo adquirido no mercado nacional, de material de consumo importado e de serviços de terceiros solicitados ao IPEN segundo o Edital Interno DPDE/IPEN N° 4/2017. A Tabela 6 apresenta o resumo do orçamento. Ressalta-se que os equipamentos permanentes estão previstos para serem utilizados somente a partir de 2018.

Ressalta-se que além dos equipamentos permanentes solicitados (presentes na Tabela 2), outros equipamentos são necessários para o desenvolvimento do projeto. Esses equipamentos estão listados na Tabela 7 e serão solicitados à FAPESP dentro de um projeto de pesquisa.

Tabela 2. Orçamento de equipamentos adquiridos no mercado nacional.

No.	Item	Qtd.	Custo (R\$)	Justificativa
1	Bomba de vácuo	01	10.000,00	Gerar vácuo
2	Sistema de geração de hidrogênio	01	25.000,00	Gerar gás deutério de alta pureza
	TOTAL		25.000,00	

Tabela 3. Orçamento de material de consumo adquirido no mercado nacional.

No.	Item	Qtd.	Custo (R\$)	Justificativa
1	Material para blindagem	-	13.000,00	Blindagem dos nêutrons e gamas emitidos pela fusão
2	Material para o vaso do dispositivo	-	8.000,00	Vaso do dispositivo
3	Material para os reservatórios, tubulações, base, anodo, etc.	-	4.000,00	Para o sistema
4	Barras de cobre para construção do solenóide	2.200 kg	65.000,00	Construção do solenóide para geração do campo magnético
5	Sensores de temperatura	5	2.000,00	Medição de temperatura no sistema
6	Material de consumo geral mecânico	-	1.000,00	Material usado para fabricação e montagem mecânica (parafusos, soldas, bits etc)
7	Material de consumo geral elétrico	-	3.000,00	Material usado para montagem da instalação elétrica (fios, conectores etc)
	TOTAL		96.000,00	

Tabela 4. Orçamento de material de consumo importado.

No.	Item	Qtd.	Custo (US\$)	Justificativa
1	Fios e barras de Tungstênio-Rhenium	vários	2.700,00	Fabricação do catodo
2	Água pesada	2 L	2.000,00	Para produção do Deutério
	TOTAIS		4.700,00	

Tabela 5. Orçamento de serviços de terceiros.

No.	Item	Qtd.	Custo (R\$)	Justificativa
1	Fabricação dos dielétricos de dióxido de titânio	-	12.000,00	-
2	Fabricação do vaso do dispositivo	-	12.000,00	-
3	Fabricação dos reservatórios	-	5.000,00	-
4	Fabricação/montagem da blindagem	-	8.000,00	-
5	Fabricação dos solenóides	-	16.000,00	-
6	Fabricação do catodo e anodo	-	2.000,00	-
7	Montagem do sistema	-	8.000,00	-
	TOTAL		63.000,00	

Tabela 6. Resumo do orçamento.

No.	Item	Custo (R\$)	Custo (US\$)
1	Equipamentos adquiridos no mercado nacional	25.000,00	
2	Material de consumo adquirido no mercado nacional	96.000,00	
3	Material de consumo importado		4.700,00
4	Serviços de terceiros	63.000,00	
	TOTAL GERAL	184.000,00	4.700,00

Tabela 7. Equipamentos permanentes que serão solicitados à FAPESP.

No.	Equipamento
1	Fonte elétrica de alta tensão
2	Fonte elétrica de baixa tensão e alta corrente
3	Sonda Langmuir
4	Sistema de aquisição de dados
5	Computadores para desenvolvimento do modelo
6	Sensores de pressão
7	Válvulas
8	Câmera

8. INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA

O desenvolvimento desse projeto de pesquisa não exige nenhuma infraestrutura especial em termos de instalação elétrica e mecânica. Contudo, como a operação desse dispositivo emite radiação gama e nêutrons ele deve ser instalado em um local com acesso controlado. O local escolhido e que está disponível para a instalação do dispositivo é o prédio do Van Der Graff, localizado na área de exclusão do Reator IEAR1. Esse prédio possui acesso controlado e blindagem contra radiação, oferecendo, assim, todas as condições necessárias para a instalação e operação do dispositivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersen et al. (2004).** L. H. ANDERSEN; O. HEBER; and D. ZAJFMAN, “Physics with electrostatic rings and traps,” *Journal of Physics B*, Vol. 37, R57–R88.
- Barnes et al. (1993).** D. C. BARNES; R.A. NEBEL; and L. TURNER, “Production and application of dense Penning Trap Plasmas,” *Physics of Fluids B*, Vol. 5, pp. 3651.
- Barnes et al. (1997).** D. C. BARNES; T.B. MITCHELL; and M.M. SCHAUER, “Beyond the Brillouin Limit with Penning Fusion experiment,” *Physics of Plasma*, Vol. 4, pp. 1745.

- Barnes (2014).** D. C. BARNES, Penning Traps as Neutron Sources, *16th US-Japan Workshop on Fusion Neutron Sources for Nuclear Assay and Applications*, Madison, WI, October 1, 2014.
- Bogaerts e Gijbels (2000).** A. BOGAERTS and R. GIJBELS, “Calculation of gas heating in direct current argon glow discharges,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 87.
- Bussard (1991).** R. W. BRUSSARD, “Some Physics considerations of magnetic inertial electrostatic confinement: a new concept for spherical converging-flow fusion,” *Fusion Technology*, Vol. 19, No. 273.
- Carr e Khachan (2010).** M. CARR and J. KHANCHAN, “The dependence of the virtual cathode in a Polywell™ on the coil current and background gas pressure,” *Physics of Plasmas*, Vol. 17.
- Carr et al. (2011).** M. CARR; D. GUMMERSALL; S. CORNISH; and J. KHANCHAN, “Low beta confinement in a Polywell modelled with conventional point cusp theories,” *Physics of Plasmas*, Vol. 18.
- Chacón et al. (2000).** L. CHACÓN; G. H. Miley; D. C. BARNES; and D. A. KNOLL, “Energy gain calculations in Penning Fusion systems using a bounce-average Fokker-Planck model,” *Physics of Plasma*, Vol. 7, No. 11.
- Cornish et al. (2014).** S. CORNISH; D. GUMMERSALL; M. CARR; and J. KHANCHAN, “The dependence of potential well formation on the magnetic field strength and electron injection current in a Polywell device,” *Physics of Plasmas*, Vol. 21.
- Dietrich, et al. (2008).** C. C. DIETRICH; L. J. EURICE; and R. J. SEDWICK, “Experimental Verification of Enhanced Confinement in a Multi-grid IEC Device”, *AIAA-2008-4760*, *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE JPC*, Hartford, CT, July 21-23.
- Elmore et al. (1959).** W. C. ELMORE; J. L. TUCK; and K. M. WATSON. “On the inertial electrostatic confinement of a plasma,” *Physics of Fluids*, Vol. 2.
- Ermakov e Hinch (2010).** A. V. ERMAKOV and B. J. HINCH, “An electrostatic autoresonant ion trap mass spectrometer,” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 81.
- Farnsworth (1966).** P. T. FARNSWORTH, Electric discharge device for producing interactions between nuclei, *USA Patent #3.258.402*, filled 11 January, 1962.
- Hedditch et al. (2015).** J. HEDDITCH; R. BOWDEN-REID; and J. KHACHAN, “Fusion in a magnetically-shielded-grid inertial electrostatic confinement device,” *Physics of Plasma*, Vol. 7.
- Hirsh (1967).** R. HIRSCH, “Inertial electrostatic confinement of ionized fusion gases,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 11, pp. 4522.

- Hirsh e Meeks (1970).** R. HIRSCH and G. A. MEEKS, Apparatus for generating fusion reactions,” *USA Patent #3.530.497*.
- Klein (2011).** A. KLEIN, “The Multiple Ambipolar Beam Line Experiment (MARBLE),” *13th U.S.-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Sydney, AU
- Knapp (2015).** D. R. KNAPP, “Planar geometry inertial electrostatic confinement fusion device,” *Journal of Physics: Conference Series* 591.
- Krall (1992).** N. A. KRALL, “The Polywell: a spherically convergent ion focus concept,” *Fusion Technology*, Vol. 22, 42.
- Krall et al. (1995).** N. A. KRALL; M. COLEMAN; K. MAFFEI; J. LOVBERG; R. JACOBSEN; and R. W. BUSSARD, “Forming and maintaining a potential well in a quasispherical magnetic trap,” *Physics of Plasmas*, Vol. 2, pp.146-158.
- Kulcinski et al. (2003).** G. L. KULCINSKI; J. WEIDER; B. CIPTI; R. P. ASHLEY; J.F. SANTARIUS; S. K. MURALI; G. PIEFER; and R. RADEL, “Alternative applications of fusion – production of radioisotopes,” *Fusion Science and Technology*, Vol. 44, 559.
- Kunhardt e Tzeng (1986).** E. E. KUNHARDT and Y. TZENG, “Monte Carlo technique for simulating the evolution of an assembly of particles increasing in number,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 67.
- McGuire e Sedwick (2005).** T. J. MCGUIRE and R. J. SEDWICK, “Improved Confinement in Inertial Electrostatic Confinement for Fusion Space power Reactors”, *AIAA J. of Propulsion and Power*, Vol. 21.
- McGuire e Sedwick (2008).** T. J. MCGUIRE and R. J. SEDWICK, “Numerical predictions of enhanced ion confinement in a multi-grid IEC device,” *AIAA-2008-4675*, *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE JPC*, Hartford, 21–23 July.
- Moss et al. (2006).** G. D. MOSS; V. P. PASKO; N. LIU; and G. VERONIS, “Monte Carlo model for analysis of thermal runaway electrons in streamer tips in transient luminous events and streamer zones of lightning leaders,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111.
- Nebel e Barnes (1998).** R. A. NEBEL and D. C. BARNES, “The periodically oscillating plasma sphere,” *Fusion Technology*, Vol. 38, No. 28.
- Nevins (1995).** W. M. NEVIS, “Can inertial electrostatic confinement work beyond the ion-ion collisional time scale?,” *Physics of Plasma*, Vol. 2, pp. 1853.
- Nguyen-Troung (2015).** H. T. NGUYEN-TRUONG, “Modified Bethe formula for low-energy electron stopping power without fitting parameters,” *Ultramicroscopy*, Vol. 149.

- Ohnishi et al. (2001).** M. OHNISHI; K. H. SATO; Y. YAMAMOTO; and K. YOSHIKAWA, “Correlation between potential well structure and neutron production in inertial electrostatic confinement fusion,” *Nuclear Fusion*, Vol. 37 (5).
- Osawa et al. (2003).** H. OSAWA; T. KAWAME; S. YOSHIOKU; and M. OHNISHI, “Study on discharge characteristics of inertial electrostatic confinement fusion, 20th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering.
- Park et al. (2005).** J. PARK; R. A. NEBEL; S. STANGE; and S. K. MURALI, “Experimental observation of a periodically oscillating plasma sphere in a gridded electrostatic confinement device,” *Physical Review Letters*, Vol. 95, No. 1.
- Rider (1995).** T. H. RIDER, “A general critique of inertial confinement fusion systems,” *Physics of Plasmas*, Vol.2 (6).
- Rosenberg e Krall (1992).** M. ROSENBERG and N. A. KRALL, “The effect of collisions in maintaining a non-Maxwellian plasma distribution in a spherically convergent ion focus,” *Physics of Fluids B*, Vol. 4 (7).
- Salisbury (1949).** W. W. SALISBURY, “Method and apparatus for producing neutrons”, *USA Patent #2.489.436*, issued
- Schauer et al. (2004).** M. M. SCHAUER; D. C. BARNES; and K. R. UMSTADTER, “Physics of non-thermal Penning-trap electron plasma and application to ion trapping,” *Physics of Plasmas*, Vol. 11.
- Sedwick e Hall (2012).** R. J. SEDWICK and G. L. M. Hall, “Magnetic core multi-grid inertial electrostatic confinement concept using p-11B. In: Nuclear and emerging technologies for space,” The Woodlands, 21–23 Mar.
- Shrestha et al. (2005).** P. J. SHRESTHA; G. H. MILEY; H. MOMOTA; R. E. THOMAS; and Y. TAKEYAMA, “Study of dipole-assisted inertial electrostatic confinement,” In *Symposium in Fusion Energy*, Sept. 26-29, Knoxville.
- Subamanian (2004).** K. M. SUBAMANIAN, “*Diagnostic study of steady state advanced fuel (D-D and D-3He) fusion in a IEC device*,” Ph.D. Thesis, Fusion Technology Institute, University of Wisconsin, December.
- Sved (1997).** J. SVED, “The commercial IEC Portable Neutron Source,” *Trans. of the ANS*, Vol. 77, 504.
- Thomas et al. (2005).** R. E. THOMAS; Y. TAKEYAMA; G. H. MILEY; H. MOMOTA; and P. J. SHRESTHA, “Dipole-assisted IEC for space propulsion,” In 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 10-13, Tuscon.

Takamatsu et al. (2005). T. TAKAMATSU; K. MASUDA; T. KYUNAI; H. TOKU; and K. YOSHIKAWA, “Inertial electrostatic confinement fusion device with an ion source using a magnetron discharge,” *Nuclear Fusion*, Vol. 46 (1).