

**IV Conferência de C&T**  
**Documento de Área – Física dos Plasmas**

**1- Estado da Arte**

**1.1 Introdução**

O uso do termo plasma para um gás ionizado começou em 1927 com Irving Langmuir. Durante seu trabalho na General Electric Co., enquanto estudava equipamentos eletrônicos baseados em gases ionizados, ele considerou que a maneira como o fluido eletrificado carregava elétrons de alta velocidade, íons e impurezas eram semelhantes aos modos com que o plasma sanguíneo carregava glóbulos brancos e vermelhos e germens. É devido a estes seus estudos, feitos com plasmas relativamente densos e frios, que hoje falamos em ondas de Langmuir e colocamos a bordo de satélites sondas de Langmuir. Gradualmente, a pesquisa em plasmas se expandiu para várias direções, das quais destacaremos algumas delas, presentes na pesquisa brasileira.

O desenvolvimento do rádio levou à descoberta da ionosfera, uma camada natural de plasma acima da atmosfera que reflete as ondas de rádio e algumas vezes as absorve. Esta descoberta levou ao estudo da propagação de ondas de rádio em plasmas e à descoberta de uma grande variedade de ondas de plasmas que podem se propagar tanto ao longo das linhas de campo magnético quanto perpendicular a elas, com características diferentes. O estudo da ionosfera na região equatorial foi uma das primeiras atividades desenvolvidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Há muitos anos, reconhece-se que a maior parte do universo é composta por plasmas; assim, os astrofísicos compreendem que o entendimento de vários processos requer um bom conhecimento da física dos plasmas. Isto é particularmente verdade para o Sol, cuja atividade determina as condições do clima espacial, essencial para uma sociedade cada vez mais dependente de sistemas tecnológicos.

A criação da bomba atômica de Hidrogênio despertou um grande interesse sobre a energia nuclear como uma possível fonte de energia para o futuro. A liberação de energia que ocorre no Sol é resultante da combinação de núcleos de hidrogênio para formar hélio, num processo conhecido como fusão termonuclear que demanda temperatura e pressão extremamente altas. Este processo é um pouco mais fácil num gás que consiste de isótopos pesados de hidrogênio, mas mesmo neste caso, as temperaturas envolvidas são ainda muito altas, levando à necessidade de inovações tecnológicas para garantir o confinamento do gás em condições ideais para a ocorrência da fusão termonuclear controlada. O esforço para produzir fusão termonuclear controlada teve início no início da década de 1950, com o projeto Sherwood, e hoje envolve um grande número de

cientistas e engenheiros da comunidade internacional em torno de máquinas cada vez maiores, complexas e mais sofisticadas. Embora bons resultados tenham sido obtidos, ainda há um longo caminho a ser percorrido até que se possa fazer uso comercial deste tipo de energia.

Quando os satélites descobriram os cinturões de radiação e começaram a explorar a magnetosfera da Terra, o termo física de plasmas espaciais passou a ser usado com frequência. Da pesquisa em fusão, os cientistas espaciais emprestaram a teoria de aprisionamento de plasma por campo magnético e da ionosfera, a teoria das ondas. A astrofísica forneceu, entre outras coisas, noções de processos magnéticos para liberação de energia e aceleração de partículas. Atualmente, a física de plasmas espaciais é uma área ativa que contribui não apenas para o entendimento das observações feitas pelos satélites, mas também para os plasmas em geral.

A comunidade de físicos de plasmas é relativamente pequena no Brasil, com aproximadamente duzentas (200) pessoas, estimativa feita a partir dos participantes do Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas (EBFP), um evento bianual que faz parte do calendário da Sociedade Brasileira de Física (SBF).

De acordo com o estatuto da comissão de Física dos Plasmas da SBF dividimos a área de plasmas em três sub áreas de atuação, plasmas tecnológicos, plasmas de fusão, e plasmas espacial e básico.

### **1.1.1 Plasmas Tecnológicos**

A sub área Plasmas Tecnológicos é a que apresenta o maior crescimento e a formação de novos grupos nos últimos 5 anos. A física de plasma aplicada a novos processos de materiais tem como foco principal a investigação sobre plasmas frios, incluindo desde estudos fundamentais até aplicações desses plasmas em processos de deposição, corrosão, ativação ou tratamento de superfícies de materiais. As atividades de pesquisa nesta sub-área têm um caráter multidisciplinar, próprio de um setor de P&D conhecido hoje como Tecnologia de Plasmas. Daí a inclusão de especialistas em vários campos de conhecimento como plasmas, materiais, química e eletrônica, dentre outras. A importância da tecnologia de plasmas pode ser aferida pela constatação da existência, hoje, de modernos laboratórios de Ciência e Tecnologia de Plasmas, aos quais estão associados aproximadamente 92 pesquisadores e 112 estudantes, em 12 instituições de ensino e pesquisa. Os projetos em andamento envolvem pesquisas em processamento de materiais de interesse aeroespacial, de materiais elétricos e demateriais biocompatíveis, polímeros, cerâmicos. Envolvem ainda processamento de materiais metálicos submetidos a tratamento de superfícies para melhoramento de suas propriedades tribológicas tais como nitretação, carbonetação e oxidação iônica em materiais ferrosos, chapas aços ferramentas, titânio e suas ligas, alumínio cromo e suas ligas. Pesquisas em

deposição de filmes resistentes ao desgaste e à corrosão em peças, ferramentas, chapas e moldes utilizando processo PVD (triódio-magnetron-sputtering), e obtenção de filmes metálicos por deposição reativa (TiN, AlN, CrN, TiAlN, TiO, CrN, TiC, ZrN, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, W-C-Co), Ti(BxCy), modificação de superfícies por plasma de biomateriais, modificação de superfícies poliméricas e processos metalúrgicos auxiliados por plasma, são também realizadas.

Merecem ainda destaque os trabalhos em desenvolvimento e caracterização de maçaricos de plasma para aplicações em aquecimento, corte e plasma spray envolvendo vários tipos de gases, e de plasma térmico e não térmico para a produção de hidrogênio gasoso e compostos de carbono a partir de gás natural ou insumos orgânicos. De alta importância do ponto de vista tecnológico, destacam-se as atividades em reatores a barreira dielétrica (descarga silenciosa), plasma a pressão alta (próxima a uma atmosfera) onde ocorre a geração de ozônio, insumo importante para variados processos como tratamento de efluentes, purificação de água e uso na medicina (ozonoterapia), bem como na destruição de bactérias e células cancerígenas levando ao aparecimento de novo setor de P&D unindo plasma e biologia. Vale citar um novo periódico que divulga esses trabalhos de aplicação de plasma ao ambiente biológico denominado *Plasma Medicine*.

Implantação iônica por imersão em plasma (III-P) tem tido repercussões de grande importância na área de novos materiais e metalurgia, já que esta técnica lida com o tratamento de superfícies de peças e ferramentas usadas nos processos de manufatura em aplicações industriais. Por exemplo, peças metálicas de ferramentas tratadas por imersão em plasma podem apresentar, posteriormente, uma resistência maior ao desgaste mecânico bem como um aumento do fator de dureza da superfície. Isto pode ser de suma importância para otimização de custos para o processo de manufatura de uma empresa. Além disto, materiais isolantes estratégicos usados na construção de satélites e veículos espaciais (como polímeros) também podem apresentar novas propriedades após o tratamento, tais como uma maior resistência ao oxigênio atômico presente na atmosfera em dispositivos espaciais orbitando em baixa altitude. Outro material de grande relevância para o setor aeroespacial, o alumínio, também pode ser submetido a este processo para melhorar resistência ao desgaste, aderência, e dureza. Cabe ainda mencionar as aplicações de plasma para o setor aeroespacial, em específico a tecnologia de propulsão a plasma para satélites bem como simulação do ambiente de reentrada atmosférica, em túnel de plasma.

O caráter multidisciplinar desta sub-área fica evidente nas pesquisas em superfícies e nanoestruturas que reúnem pesquisadores com o objetivo comum na modificação física, química e óptica de superfícies, visando à produção e caracterização de novos materiais nanoestruturados em filmes finos e recobrimentos de: biomateriais, biocerâmicas, óxidos metálicos, cerâmicas, materiais supercondutores

e materiais magnéticos. Para a produção desses novos materiais e superfícies são usados, principalmente, o crescimento de filmes por evaporação térmica e plasmas tecnológicos como magnetron sputtering e sputtering por ICP, além de ablação a laser e métodos eletroquímicos. Estes novos materiais são aplicados em recobrimentos de biomateriais para a medicina; no controle da corrosão em metais e ligas e; em dispositivos nanomagnéticos.

Com seu forte apelo inovador, todos os trabalhos na área de plasmas tecnológicos garantem a formação de recursos humanos especializados, o reforço da pós-graduação acadêmica e o Mestrado Profissional, promovem a criação de novos cursos aplicados à Ciência e Engenharia de Materiais, a produção de patentes e a sua interação com o setor produtivo empresarial.

### **1.1.2 Plasmas de Fusão**

As pesquisas em fusão termonuclear controlada, após passar por uma fase crítica na década de 1990, iniciaram sua nova etapa em fusão por confinamento magnético no ano de 2005, com a definição do local de construção do tokamak internacional ITER em Cadarache – França, em um terreno de 180 hectares.

O tokamak ITER, em construção por um consórcio entre a Comunidade Européia (EURATOM) e 6 países, Japão, Rússia, EUA, China, Coreia do Sul, Índia, tem planos de inauguração para 2016. A previsão do ITER é a produção de 500 MW por um tempo superior a 400 segundos, com fator Q (potencia extraída / gasta) maior que 10. Uma segunda geração do reator nuclear por fusão magnética controlada de demonstração (DEMO) já está em fase de projetos e deve marcar o uso comercial da energia elétrica produzida por um reator de fusão nuclear controlada. Atualmente o tokamak JET (Joint European Torus) na Inglaterra é o maior em operação no mundo e vários testes e parâmetros de operação serão diretamente utilizados no tokamak ITER. Dentro do acordo de cooperação entre Brasil e EURATOM, recentemente assinado, estão previstos intercâmbios de cientistas brasileiros tanto no JET como em outros tokamaks da Comunidade Européia.

Uma outra tendência para fusão termonuclear controlada é a fusão inercial representado principalmente pelo NIF (National Ignition Facility) nos Estados Unidos da América. Por se tratar de tecnologia baseada em laser de alta potência, existem vários trabalhos relacionados que são classificados e de uso militar. A conquista mais recente é a operação simultânea do arranjo de 192 lasers, atingindo uma potencia de 1 MJ, abrindo caminho para um reator híbrido de fusão fissão LIFE (Laser Inertial Fusion-Fission Energy). Um fator positivo deste reator é a utilização dos materiais radioativos que sobram dos reatores de fissão, isto é, o lixo atômico, assim oferecendo pela primeira vez um modo seguro de eliminar os restos radioativos, gerando novas energias. O reator LIFE, poderia em

princípio produzir gigawatts de potencia 24 horas por dia num período superior a 50 anos sem realimentação. A previsão do primeiro reator piloto é para 2020, e o reator de demonstração em 2030.

No Brasil existem atualmente três tokamaks em operação: o tokamak esférico ETE no INPE, o NOVA-UNICAMP na UNICAMP, e o TCABR na USP. O tokamak ETE é uma máquina conceitual, onde se busca uma nova configuração magnética de alto desempenho. O tokamak NOVA-UNICAMP é o mais antigo dos três, utilizado para treinamento e formação de alunos de pós-graduação na área. O tokamak TCABR é o maior e mais completo tokamak brasileiro, construído para os estudos de aquecimento auxiliar, novo regime de operação de alto confinamento, e formação de pesquisadores qualificados na área. Existem também trabalhos e grupos em setores muito importantes na área de fusão como: estudo de sistemas fusão-fissão e ADS-fissão para transmutação de rejeitos altamente radioativos (UFMG), modelagem de reatores híbridos fusão-fissão, estudos da interação plasma-parede em máquinas de plasmas termonucleares (UnB, UFF, UESC, ITA), análise do surgimento de turbulência em plasmas de fusão (UFPa, USP) e medidas de choque e ionização de moléculas por elétrons relevantes para reatores de fusão termonuclear (UFRJ, UFJF).

Há que se reconhecer que Brasil ainda não atingiu um patamar de excelência nesta área, quer seja em número de pesquisadores ou em avanços tecnológicos, a ponto de participar diretamente em consórcios do tipo ITER ou projeto NIF. Entretanto, o Ministério de Ciência e Tecnologia criou em 2007 (Portaria nº 870, de 21 de novembro de 2007, publicada em 22 de novembro de 2007) a Rede Nacional de Fusão (RNF)/CNEN para impulsionar as pesquisas na área de fusão termonuclear controlada. A RNF conta com aproximadamente 90 pesquisadores brasileiros, em 15 instituições de pesquisa e ensino, tem seu comitê técnico científico representado por 6 pesquisadores eleitos da comunidade e um representante da CNEN. Dentro do acordo de Cooperação Científica e Tecnológica, assinada em 19 de janeiro de 2004, entre o Governo da República Federativa do Brasil e a Comunidade Européia, a RNF iniciou várias atividades de intercâmbio com a Comunidade Européia. Um dos projetos de cooperação mais significativa é o início da participação brasileira em campanhas no novo regime de operação do tokamak JET na Inglaterra que produzirá base de informações para o tokamak ITER. Para centralizar futuros trabalhos em fusão termonuclear controlada brasileira, está sendo criado o Laboratório Nacional de Fusão (LNF) em um terreno de aproximadamente 70 hectares em Cachoeira Paulista, S.P., para onde será deslocado o experimento ETE e suas facilidades, incluindo o pessoal hoje responsável. Há previsão de incremento de pessoal e construção de um novo tokamak.

Outro ramo da pesquisa em fusão em destaque são os grupos atuantes na área de Caos em Plasmas, constituídos por 7 instituições

de pesquisas (UEPG, USP, UFPa, UFRGS, UFPel, ITA, UFRN), com participação de 14 pesquisadores, em pesquisas como turbulência e transporte caótico de partículas, campos magnéticos caóticos, origem da turbulência, caos espacial e temporal, acoplamento de ondas não lineares, estabilidade não linear de feixes de partículas carregadas, dinâmica não linear em eletrônica de vácuo e geradores de microondas, ilhas de ressonância e relaxação em feixes densos, coerência e incoerência na interação não linear de ondas em plasmas e feixes, detecção de estruturas coerentes lagrangeanas.

Há que se registrar ainda a existência de muitos pesquisadores brasileiros, formados no Brasil na área de Plasmas, que hoje trabalham em centros de pesquisa do exterior, principalmente na Europa e Estados Unidos. Manter meios de comunicações e possibilitar colocações destes pesquisadores nos laboratórios locais, em conjunto com produção de recursos humanos nacional, e incentivar a cooperação internacional, elevando a pesquisa nacional em fusão termonuclear controlada, será uma necessidade para acompanharmos o progresso internacional no uso desta energia limpa, segura, abundante, ecologicamente correta e disponível igualmente em todos os lugares do nosso planeta.

### **1.1.3 Plasma Espacial e Básico**

A maior parte do Universo observável está no estado de plasma. O regime dos plasmas varia desde os densos núcleos das estrelas até o plasma elétron-pósitron relativístico em torno de pulsares e inclui o vasto plasma difuso que preenche os espaços entre as galáxias.

O objetivo desta área é aproximar especialistas envolvidos com Astrofísica, Plasmas Espaciais e Plasmas em Laboratório no sentido de promover ampla troca de novos resultados e recentes progressos nessas áreas de pesquisa. Além disso, muitas das questões fundamentais, espaciais e astrofísicas, requerem a física de plasma para as suas respostas. Algumas dessas questões são: Como o universo começou? Como a Terra e os planetas foram formados? Qual é a natureza do ambiente extremo do plasma em torno dos buracos negros? Como a atividade solar interfere no espaço próximo à Terra e aos demais planetas?

No Brasil existem vários grupos (UNESP, INPE, MACKENZIE, UNIVAP, UFF, UFRGS, USP) e pesquisadores envolvidos no estudo teórico, observacional e numérico sobre a importância de campos magnéticos e processos MHD na origem, estrutura e evolução dinâmica de fontes astrofísicas como o Sol, estrelas jovens, nuvens interestelares, sistemas estelares binários, buracos negros galácticos, estrelas de nêutrons, pulsares, supernovas, núcleos ativos de galáxias, jatos, ventos, discos de acreção e aglomerados de galáxias. Outros pesquisadores têm concentrado esforços na investigação dos efeitos do campo magnético no meio interplanetário difuso, nos meios

interestelar, inter-galáctico e intra-aglomerado e também no universo primordial. Fenômenos relacionados envolvendo a produção de partículas astrofísicas e sua aceleração, explosões de raios gama, instabilidades em plasmas, reconexão magnética e processos de dínamo também são estudados. A interação Sol-Terra, determinante do que se convencionou chamar de Clima Espacial é também objeto de estudo de vários pesquisadores do INPE.

O Clima Espacial pode ser entendido como o conhecimento e previsão da resposta do ambiente espacial às contínuas mudanças dos fenômenos solares (atividade solar). Dessa forma, os efeitos do Clima Espacial sobre a Terra são conseqüências de diversos fatores, os quais incluem o comportamento do Sol, o espaço interplanetário, o campo magnético terrestre (Magnetosfera) e a natureza da atmosfera. Explosões e ejeções solares injetam grande quantidade de massa e energia solar no meio interplanetário, formando o vento solar e seus transientes, alcançando a Terra e provocando tempestades geomagnéticas e uma série de fenômenos geofísicos que afetam desde o funcionamento de satélites em órbita da Terra, até o uso de receptores GPS na superfície. Além do vento solar, o aumento intenso da radiação UV, até o raio X, altera o comportamento da atmosfera neutra, destruindo o ozônio e modificando a camada ionosférica entre outros efeitos.

Por outro lado, o plasma astrofísico co-existe com partículas de poeira em muitas situações. Essas partículas estão carregadas tanto negativamente como positivamente dependendo do meio do plasma ao seu redor. Este sistema de partículas carregadas, elétrons e íons forma o chamado plasma empoeirado. Recentemente o interesse por plasma empoeirado tem crescido significativamente por ter sido reconhecida sua importância em um grande número de aplicações astrofísicas e física planetária, física de sistemas fortemente acoplados, problemas em laboratório, incluindo o processamento de plasma e aparelhos de fusão, etc.

Outra área que tem despertado bastante interesse recentemente é a de aceleradores baseados em plasmas. Nesses aceleradores, pulsos eletromagnéticos ou feixes de partículas carregadas são injetados em um plasma gerando separação das cargas do plasma e excitando ondas de densidade de grande amplitude cujos campos elétricos são capazes de acelerar elétrons a altas energias. Tem-se demonstrado que é possível a obtenção de gradientes de aceleração várias ordens de grandeza maiores que os obtidos em aceleradores convencionais baseados em estruturas metálicas (os chamados LINAC). Porém, aspectos tais como instabilidades no plasma e efeitos não lineares na propagação do pulso gerador podem afetar fortemente a qualidade do feixe obtido, exigindo um entendimento maior dos vários processos que ocorrem ao longo da aceleração. Embora não existam arranjos experimentais experiências de aceleração de partículas em plasma no Brasil, há grupos teóricos envolvidos no seu estudo.

Métodos aplicados ao estudo de plasmas também são largamente utilizados na investigação do transporte de feixes intensos de partículas carregadas eletricamente. O estudo de feixes tem grande relevância no desenvolvimento de aceleradores de partículas e de dispositivos geradores de radiofrequência capazes de atender às necessidades exigidas em áreas como comunicação, fusão inercial com íons pesados, transmutação de lixo nuclear e fontes de nêutrons. Dada a alta intensidade do feixe, a densidade de carga e a força eletrostática entre as partículas são extremamente grandes, sendo necessária a utilização de campos eletromagnéticos intensos para confiná-lo. Devido a grande amplitude das forças envolvidas no sistema, efeitos não lineares passam a ser determinantes na dinâmica das partículas. Isto leva ao aparecimento de complicados fenômenos na propagação do feixe que podem afetar sensivelmente a eficiência do dispositivo em questão.

## ***1.2 – Desafios e Perspectivas***

**Plasmas Tecnológicos:** As aplicações tecnológicas de plasmas já existem em abundância nos países com tecnologias de ponta bastante avançadas. No Brasil, ainda se necessita de incentivos à inovação junto a indústria, para aumentar as parcerias com as empresas e as universidades. Devem-se também incentivar criações de novos núcleos ou centros de pesquisa que atuem diretamente no desenvolvimento e transferência de tecnologia da universidade para a empresa, com contratação de pessoal qualificado. As escolas de engenharia, em geral, poderiam dar maior enfoque nesta área, a exemplo do que já acontece fora do Brasil; a expansão da abrangência do plasma tecnológico aos diversos setores produtivos tem motivado a criação de curso de engenharia de plasma em instituições européias.

**Plasmas de Fusão:** A existência de uma fonte de energia inesgotável, limpa, segura, ecologicamente e economicamente viável está se tornando cada vez mais próxima. Alta é a probabilidade de nos próximos 10 a 20 anos termos acontecimentos importantes nesta área e cada país deve estar preparado para esta nova era, desenvolvendo sua capacidade humana e material, gradativamente. Neste momento, a criação do Laboratório Nacional de Fusão, com o apoio do MCT e união dos pesquisadores da área é o grande desafio. Como consequência, as perspectivas de trabalhos em cooperação internacional e nacional, o engajamento do país nesta corrida a energia do futuro com envolvimento de universidades, empresas e centros de pesquisa seria algo viável e possível. Ainda se faz necessário o investimento em recursos humanos especializados nesta área.



**Plasmas Espacial, Astrofísico e Básico:** Tanto em países com programas espaciais consolidados (EUA, Comunidade Européia, Japão e Canadá) como nos em desenvolvimento (Índia e China) uma parcela importante dos investimentos é feita em satélites científicos. Assim, é extremamente importante que as universidades e outros institutos com grupos de pesquisa na área insiram-se de forma efetiva no setor espacial. Outro desafio que se faz presente é o de tornar o programa de Clima Espacial, recém criado no INPE, operacional em moldes internacionais. A operacionalidade deste programa passa por grandes investimentos para monitoramento, tanto em solo (da ionosfera, campo magnético terrestre, observações do Sol, dentre outros) quanto via satélite (ionosfera, Sol, etc).

### **1.3 – Brasil na área**

No Brasil, identificamos vinte e duas (22) instituições de pesquisa e ensino distribuídas em 11 estados, com um total aproximado de duzentos (200) pesquisadores atuantes na área de física de plasmas. Existem ainda sete (7) empresas que utilizam plasma para tratamento de materiais. Como em outras áreas da física, a predominância das instituições é no sudeste e sul do país, exceção feita ao grupo de plasma tecnológico na UFRN com 25 pesquisadores e 39 estudantes. A Figura 1 ilustra a distribuição geográfica da comunidade. A informação do mapa deve ser complementada com a lista de instituições fornecida ao lado. A Figura 2 mostra a distribuição de profissionais da área, de acordo com as sub-áreas aqui definidas. Observa-se um pequeno número de pesquisadores na sub-área de plasmas astrofísico, espacial e básico, 11%. Entretanto, devemos notar que a comunidade astronômica conta hoje com mais de 500 pessoas e realiza pesquisa em diversos ramos e seu fórum de discussão e apresentação dos trabalhos é a reunião anual da Sociedade Astronômica Brasileira (SAB). A reunião da SAB não faz parte do calendário de reuniões da SBF. Assim, o número de astrônomos que participam na sub-área plasmas astrofísico, espacial e básico é reduzido.

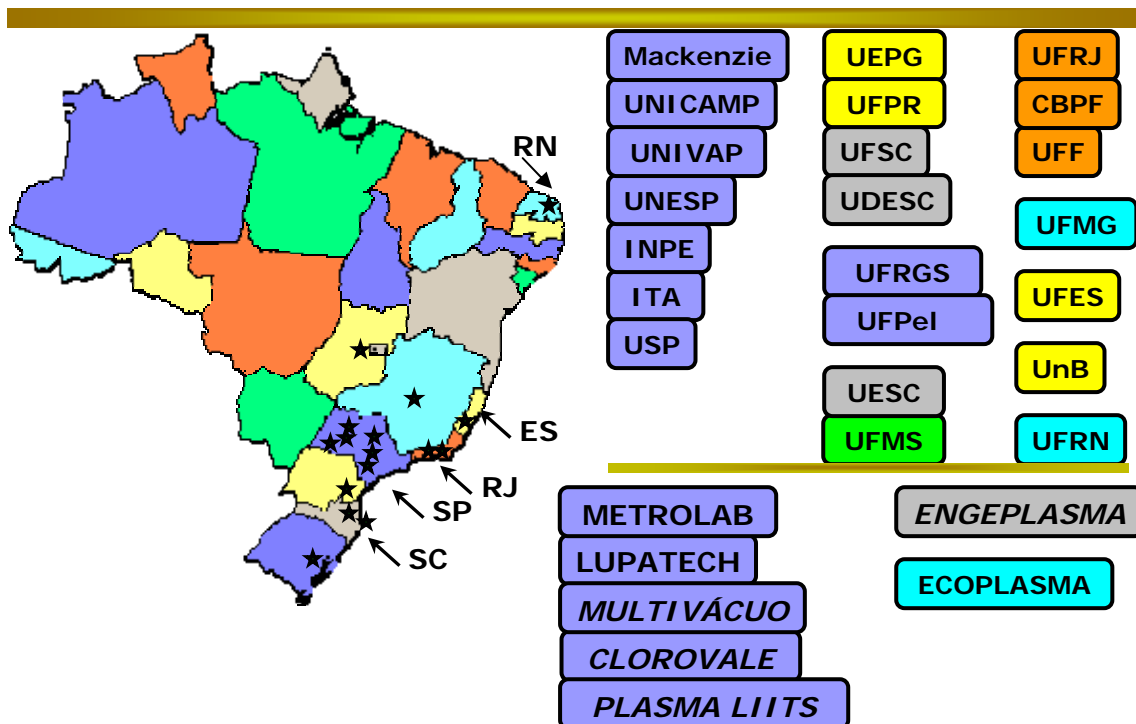


Figura 1 –Distribuição geográfica das Instituições e empresas no Brasil.

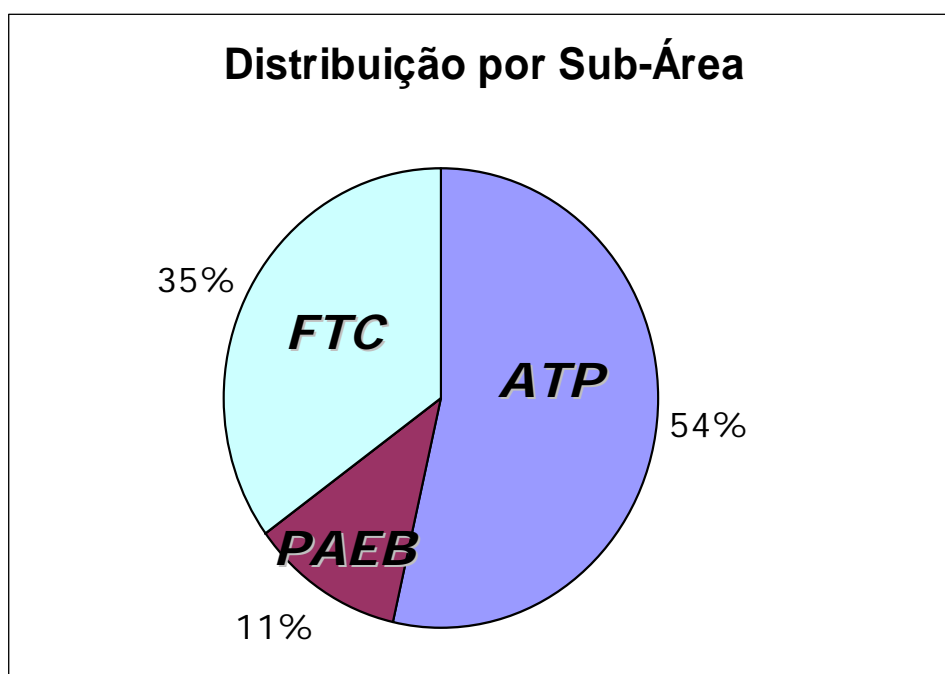


Figura 2 : **ATP** - Aplicação Tecnológica de Plasma; **FTC** – Fusão Termonuclear Controlada; **PAEB** – Plasmas Astrofísico, Espacial e Básico

#### ***1.4 Infraestrutura Experimental e Computacional***

A infra-estrutura em física de plasmas pode ser dividida de acordo com as três sub-áreas, em concordância aos tamanhos dos equipamentos e máquinas, e do tipo de investimentos que são distintos para cada sub área.

**Plasmas Tecnológicos:** Esta área se caracteriza pela grande diversidade de equipamentos e dispositivos necessários para utilização do plasma em diferentes formas de processamento de materiais e outras aplicações afetas a quase todas as áreas de ciência e tecnologia moderna. Em geral são máquinas de pequeno porte quando comparadas àquelas voltadas à fusão termonuclear controlada, possíveis de serem manuseadas em laboratórios de pequeno e médio porte. Entretanto, os instrumentos de medições e análises são bastante onerosos e sofisticados. As máquinas de plasma mais comuns são os reatores do tipo: RF, ICP, Pinch, DBD, III-P. As técnicas de medidas mais comuns são: espectroscopia de massa e energia, sondas eletrostáticas, espectroscopia óptica, medidor de ângulo de contato e energia de superfície, espectrofotômetro ultravioleta-visível, microscopia óptica, microscopia de força atômica, medidor de aderência filme/substrato, espectrofotômetro FTIR.

**Plasmas de Fusão:** Como já mencionado, existem no Brasil três tokamaks em operação em três laboratórios de plasma, TCABR-USP, ETE-INPE, NOVA-UNICAMP pela ordem de grandeza, tamanho do grupo e investimento respectivamente. Em cada tokamak existem sistemas de diagnósticos, como espalhamento Thomson, interferometria por microondas, espectroscopia no visível e ultravioleta do vácuo, bolometria, reflectometria, feixes de lítio, sondas eletromagnéticas, e sistemas de comando e controle, aquisição e processamento de dados computadorizados em forma de clusters. É prevista para próximos três anos a construção do Laboratório Nacional de Fusão na cidade de Cachoeira Paulista no estado de São Paulo.

**Plasmas Astrofísico, Espacial e Básico:** Para esta sub-área existem tanto pesquisadores teóricos como observacionais. Para os teóricos, a infra-estrutura básica são computadores e "clusters" de alto desempenho para realização de suas pesquisas. Simulações numéricas para o entendimento dos fenômenos astrofísicos são feitas por vários pesquisadores. Já para os pesquisadores observacionais, além da infra-estrutura computacional é necessário também acesso a equipamentos de observação, tanto a partir do solo quanto do espaço. Uma articulação conjunta entre agências de fomento estaduais e federais permitiu a participação do Brasil nos telescópios

Gemini e SOAR. O Observatório Gemini consiste de dois telescópios gêmeos, com espelhos primários de 8 metros de diâmetro, desenhados para operar no óptico e no infravermelho. O Gemini sul está localizado em Cerro Pachon, no Chile e o outro está no Havaí (hemisfério norte). Os telescópios Gemini são operados por um consórcio de sete países. O telescópio SOAR (Southern Astrophysical Research), também localizado em Cerro Pachon, Chile, possui um espelho de 4m e é operado por um consórcio incluindo duas universidades americanas. Instrumentação de ponta para esses telescópios está em desenvolvimento em algumas instituições brasileiras. Temos também participação na missão CONvection ROTation and planetary Transits (COROT), que possui dois programas científicos principais operando simultaneamente em regiões adjacentes do céu: (i) detecção e estudo de oscilações estelares (astrossismologia) e (ii) procura de planetas extra-solares, em particular planetas telúricos. Programas adicionais envolvendo variabilidade fotométrica serão igualmente realizados. O Brasil participou da missão internacional HETE-2 ("High Energy Transient Explorer"-space.mit.edu/HETE), liderada pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), através do INPE. O HETE-2 foi o primeiro satélite dedicado ao estudo das explosões de Raios Gama e operou de 2000 a 2006, obtendo resultados extremamente importantes na área.

O Brasil conta ainda com experimentos dedicados à observação solar: o Brazilian Solar Spectroscope (BSS), em operação desde 1990, o único espectrógrafo da América Latina e do hemisfério Sul destina-se à investigação em tempo real de fenômenos solares e ao monitoramento diário (11-19 UT) da atividade solar dentro da banda de ondas de rádio decimétricas (1000-2500 MHz); o Brazilian Decimetric Array (BDA) é um radio-interferômetro de custo otimizado que emprega técnicas modernas de interferometria dentro da banda rádio (1,2-1,7, 2,8 e 5,6 GHz). As 5 antenas do protótipo, instaladas no INPE-Cachoeira Paulista, já se encontram em operação desde o final de 2004. Trata-se de um imageador rápido (~ 10 imagens por segundo) que em 2007 teve sua Fase-II de desenvolvimento aprovada como Projeto Temático pela FAPESP. Ao final dessa fase, prevista para 2010, 26 antenas de 4 m de diâmetro, distribuídas numa configuração em forma de "T", com linhas de base de 252 m e 162 m, respectivamente nas direções Leste-Oeste e Sul, estarão fornecendo imagens do Sol na faixa de frequências citada acima, com uma resolução espacial de até 45 segundos de arco em 5,6 GHz. A rede observacional voltada ao Clima Espacial conta ainda com ionosondas, uma rede de magnetômetros, de detectores de sinal GPS e de detector de muons.

### **1.5 Necessidade de pessoal para os próximos cinco anos.**

O plasma tecnológico é uma área que ainda necessita de muitos pesquisadores, principalmente em novos materiais, semicondutores,

aplicação na biologia e medicina e setor aeroespacial. Deveríamos ter como meta um aumento de 50% no número de profissionais da área nos próximos cinco (5) anos, o que nos permitiria acompanhar as tendências mundiais na área.

A área de fusão termonuclear controlada, para acompanhar os esforços mundiais, deve ter um aumento considerável nos próximos 5 anos, principalmente com a construção do Laboratório Nacional de Fusão em Cachoeira Paulista e início de projetos de cooperação internacional com EURATOM e outros países como Estados Unidos e Japão. Para atender a esta demanda, a meta deveria ser dobrar o número de profissionais dedicados a esta sub-área.

Para os próximos cinco anos a área espacial/astrofísica/básica necessitará de pessoal não só acadêmico mas também técnico como analistas de sistemas, técnicos de laboratório, para a operação de equipamentos, engenheiros para construção de equipamentos de ponta para observatórios e satélites.

## **1.6 Impactos da área nos processos Inovação Tecnológica do País.**

O avanço da tecnologia em plasmas certamente é uma área que pode trazer grandes impactos nos processos da Inovação Tecnológica do País, desde as TV's a plasma, endurecimento e resistência superior em materiais, materiais biologicamente compatíveis, aplicação do plasma em medicina, tratamento de escórias e resíduos industriais ou líquidos, tratamento de lixos hospitalares e muitas outras utilidades que influenciam o cotidiano. Cada uma destas utilidades pode ser acompanhada de uma inovação tecnológica que possibilite a inserção do processo na sociedade, gerando novos mercados e possibilidades de empregos. No setor de microeletrônica, a fabricação de dispositivos, a exemplo dos microprocessadores presentes em nossos celulares e computadores é hoje fortemente alicerçada em processos de deposição e corrosão a plasmas; no entanto é muito pequeno o grupo de pesquisadores e laboratórios engajados nessa linha de pesquisa. Plasmas também têm encontrado aplicação em processos de combustão, possibilitando alteração das rotas termodinâmicas de processos energéticos, como em turbinas a gás. A combustão assistida a plasma é uma fronteira de pesquisa que pode render inovações tecnológicas relevantes para a ainda incipiente indústria nacional de queimadores e turbinas a gás. De interesse do setor aeroespacial, existem grupos nacionais com linhas de P&D consolidadas sobre propulsão a plasma para satélites e simulação de condições de reentrada atmosférica usando túnel de plasma.

Na tecnologia de fusão termonuclear controlada já são conhecidas as inovações tecnológicas que esta área proporcionou nas indústrias do Japão, China, Coréia, Alemanha, França, Estados Unidos e outros países. As técnicas de materiais supercondutores para

produção de campos magnéticos elevados, necessidade de materiais de primeira superfície em contacto com plasma nos reatores, desenvolvimento de parque computacional para simulação e controle dos reatores, materiais especiais para proteção contra partículas energéticas como nêutrons de 14 MeV, sistemas de monitoramento e diagnósticos de plasmas termonucleares, faz com que as tecnologias acompanhem a necessidade da área. No Brasil essas tecnologias ainda estão incipientes. Embora seja um dos maiores produtores mundiais de nióbio, material principal para a produção de bobinas supercondutoras, não existe ainda uma indústria nacional no ramo.

A contribuição na sub-área espacial, o projeto MIRAX (Monitor e Imageador de Raios X) liderado pelo INPE, se constitui na primeira missão astronômica brasileira projetada para ser lançada ao espaço em 2014. É um sistema imageador de raios X na faixa de 2 a 200 keV, com resolução angular de alguns minutos de arco e amplo campo de visada que realizará um levantamento do comportamento espectral e temporal de um grande número de fontes transientes de raios X em escalas de tempo de horas a meses. Os instrumentos do MIRAX estão sendo desenvolvidos no INPE, em cooperação com a Universidade da Califórnia San Diego, o MIT e a Universidade de Tuebingen, na Alemanha. No Brasil, pesquisadores da USP, da UFRN e da UFRS também integram a equipe científica da missão. Outro fato importante é o crescente envolvimento de pesquisadores em projetos para a construção de instrumentação de ponta para os grandes telescópios.

### **1.7 Indústrias/empresas parceiras e os projetos associados.**

Para o desenvolvimento da área espacial devemos contar com a participação da toda comunidade, além de representantes do setor aeroespacial, como a Embraer, a AIAB (Associação das Indústrias Aeroespaciais Brasileiras) e AAB (Associação Aeroespacial Brasileira).

Na área de plasma tecnológico já existem varias empresas parceiras e projetos associados em execução de acordo com a Figura 1. Entretanto, de acordo com níveis de pesquisa, número de grupos e participantes nesta área é possível maior investimento e incentivo para criar novos empreendimentos nesta sub-área de plasmas.

Na área de plasmas de fusão, ainda não existem empresas formalmente envolvidas em parcerias e projetos associados, mas o desenvolvimento acentuado na pesquisa e construção de novas máquinas de fusão termonuclear controlada deverá incentivar parcerias com empresas de materiais nucleares, supercondutores, geradores de onda de potência, materiais de primeira superfície interação plasma, sistemas de computação de alto desempenho, e redes neurais, além de sistemas de diagnósticos óticos e eletromagnéticos de uso industrial.

## ***2 Relevância para a Sociedade***

### ***2.1 Formação de Pessoal***

**Plasma Tecnológico:** O aporte de recursos financeiro para as pesquisas em plasmas tecnológicos cresceu nos últimos anos. Entretanto, faltam profissionais, principalmente em novos materiais, semicondutores, e aplicações na biologia e medicina, que poderiam trazer rapidamente benefícios para a sociedade.

**Plasma de Fusão:** É prevista para os próximos três anos a construção do Laboratório Nacional de Fusão na cidade de Cachoeira Paulista no estado de São Paulo. Serão necessários investimentos para a formação de capacitação técnico-científica nesta área.

**Plasma Espacial e Básico:** O avanço na área de instrumentação astronômica tanto espacial quanto nos observatórios, demanda a formação de pessoal qualificado para o desenvolvimento de hardware e software. Devem-se criar condições para que, desde o ensino fundamental, a sociedade tenha conhecimento dessas necessidades promovendo assim o interesse pela área espacial.

### ***2.2 Desenvolvimento científico e tecnológico***

**Plasma Tecnológico:** A área de tecnologia de plasmas está trazendo e deverá trazer grandes impactos nos processos de inovação tecnológica do país, desde televisões a plasma, endurecimento e resistência superior em materiais, materiais biologicamente compatíveis, aplicação do plasma em medicina, tratamento de escórias e resíduos industriais ou líquidos, tratamento de lixo hospitalares, combustão assistida a plasma e muitas outras aplicações tecnológicas que influenciam o cotidiano, como ilustrado na Figura 3. No setor aeroespacial a propulsão a plasma e também a simulação de ambiente de reentrada atmosférica usando túnel de plasma são linhas de P&D bem consolidadas de alguns grupos nacionais . Faz-se necessária uma maior articulação entre os profissionais, na forma de comissões e reuniões específicas de modo a incentivar e acompanhar de perto o desenvolvimento científico e tecnológico desta sub-área

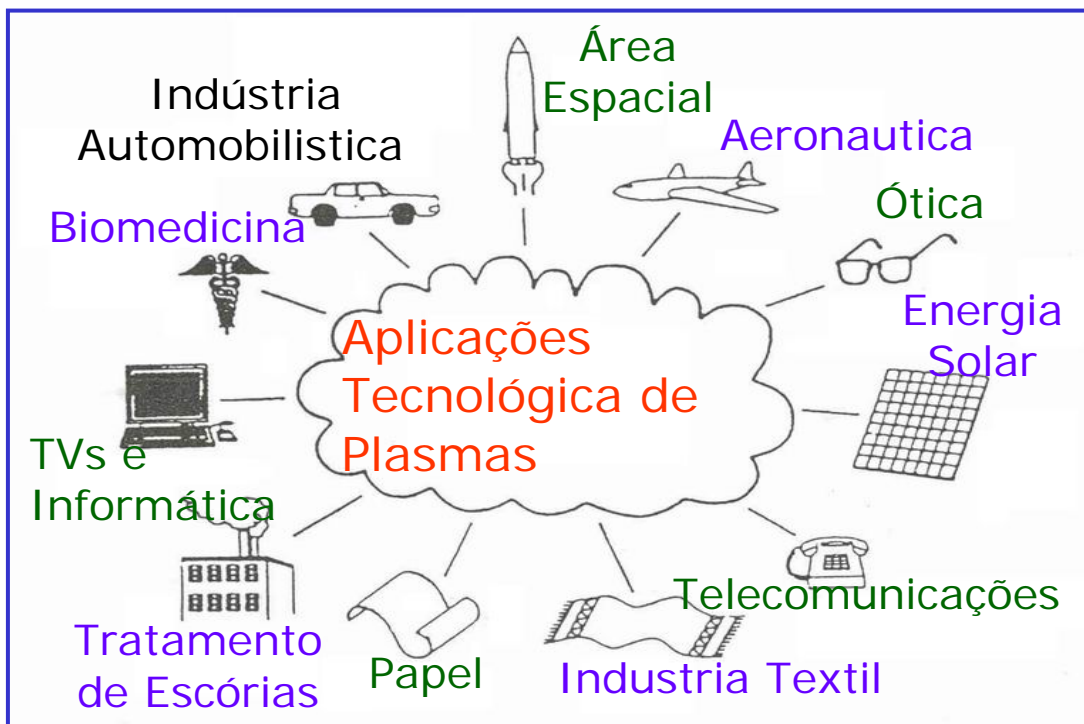


Figura 3

**Plasma de Fusão:** As técnicas para produção de materiais supercondutores resistentes a altíssimas temperaturas para geração de campos magnéticos elevados, se fazem necessárias, já que estes materiais entram em contacto com radiação do plasma nos reatores, recebendo impacto de nêutrons da ordem de 14 MeV. Há necessidade de sistemas de monitoramento e diagnósticos de plasmas termonucleares. No Brasil essas tecnologias ainda estão incipientes. Embora seja um dos maiores produtores mundiais de nióbio, material principal para produção de bobinas supercondutoras, não existe uma indústria nacional no ramo. Portanto, são necessários ainda grandes investimentos na área.

**Plasma Espacial e Básico:** A astronomia observacional sempre estimulou a inovação tecnológica, pois pesquisa de ponta só pode ser feita com tecnologia de última geração.

### ***2.3 Impacto na Economia***

Como as tecnologias envolvidas nas áreas de plasma tecnológico e plasma de fusão têm ampla aplicabilidade, conforme já citado, é de se esperar transferência de tecnologia aos setores industriais envolvidos com estas tecnologias.

Certamente a tecnologia de ponta desenvolvida, por exemplo, para tratamento de imagens astronômicas, terão aplicabilidade a outras ciências, como a medicina.

Os reatores de fusão termonuclear controlada trarão impactos sem precedentes na economia de qualquer país; como um exemplo,



10 gramas de deutério (isótopo de hidrogênio) que é possível de ser extraído de 500 litros de água, e 15 gramas de trítio (outro isótopo de hidrogênio) produzidos de 30 gramas de lítio, produziria energia elétrica suficiente para uma vida inteira de uma pessoa em um país industrializado, sem efeito como emissão de carbono, lixo atômico perene, ou dano ambiental.

### ***3. Inclusão Social***

**Plasma Tecnológico:** Como se trata de uma área com grandes aplicações, conforme listadas no item anterior, a inovação tecnológica irá possibilitar a inserção de pessoal altamente qualificado na sociedade, gerando novos mercados e possibilidades de empregos.

**Plasma de Fusão:** A recente criação do Laboratório Nacional de Fusão, prevista para entrar em operação daqui a três anos, possibilitará a formação de profissionais nas áreas técnica e científica altamente qualificados com envolvimento de universidades e centros de pesquisas em todo o território nacional.

**Plasma Espacial e Básico:** A área espacial requer instrumentação de última geração. As confecções deste novo instrumental estão concentradas em poucas instituições mas já conta com alta participação da indústria nacional. Certamente o aumento significativo de investimento nesta área irá gerar novos mercados de trabalho e empregos.

### ***4. Recomendações***

#### **Plasmas Astrofísico, Espacial e Básico:**

- Articulação dos diversos grupos para o desenvolvimento de instrumentação espacial e a abertura de novas oportunidades na área espacial.
- Participação brasileira em missões internacionais com o intuito de estudar o Clima Espacial e pequenos corpos do Sistema Solar.
- Aproveitar as políticas públicas existentes para a inovação (Fundos Setoriais, Lei da Inovação, p. ex.)

#### **Plasma Tecnológico:**

- Criação de centros tecnológicos de plasmas em vários estados, principalmente no norte nordeste.
- Incentivar projetos de parcerias universidade, centros de pesquisa/ indústria, empresas com financiamentos pontuais.

- Incentivar criações de cursos de plasma tecnológico em universidades e centros de pesquisa.
- Incentivar indústrias nacionais que produzam equipamentos de plasma tecnológico e nuclear.
- Aproveitar as políticas públicas existentes para a inovação (Fundos Setoriais, Lei da Inovação, p. ex.)

### **Plasma de Fusão:**

- Acelerar a construção e operação do Laboratório Nacional de Fusão.
- Incentivar a formação de recursos humanos na área de Plasma de Fusão.
- Intensificar as colaborações internacionais com EURATOM.
- Iniciar colaborações internacionais, com respaldo do MRE, com países como USA, Japão, China, Coréia e Rússia.
- Incentivar a criação de cursos e grupos de física de plasmas básica e de altas temperaturas a nível nacional, com ênfase no norte nordeste.
- Aproveitar as políticas públicas existentes para a inovação (Fundos Setoriais, Lei da Inovação, p. ex.)

Maria Virginia Alves

Marisa Roberto

Munemasa Machida

Renato Pakter

Vera Jatenco

Agradecimentos a Homero Santiago Maciel