



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA

**LabPlasma**  
UDESC-Joinville - CCT

*Mini-curso:  
Introdução a Plasmas*

XVI Semana da Física

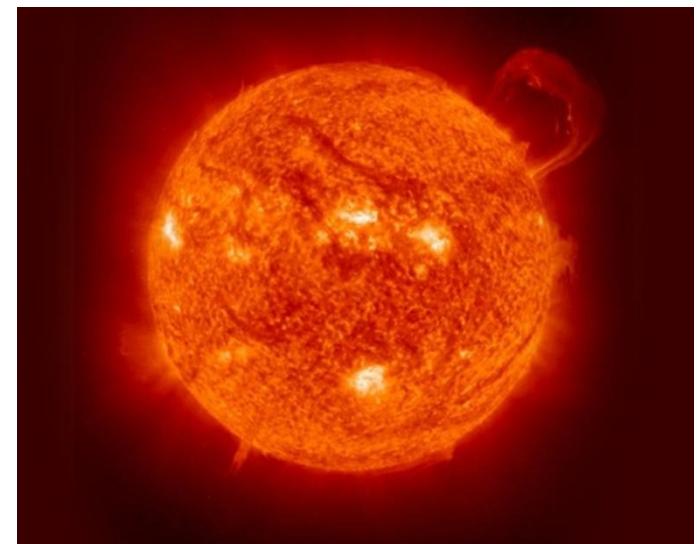
Julio César Sagás

22 de setembro de 2016

# Sumário

- *História*
  - Primeiras observações de plasmas
  - Desenvolvimento da tecnologia de plasmas
- *Fundamentos físicos e químicos*
  - Processos colisionais
  - Classificação de plasmas
  - Propriedades
  - Tipos de descargas elétricas
  - Química de plasmas
- *Aplicações*
  - Aplicações de plasmas térmicos
  - Aplicações de plasmas não-térmicos

# Um pouco de história



# Linha do tempo

1900

# Um pouco de história

1923

Irving Langmuir descobre as oscilações do plasma.



~1900

Joseph John Thomson revela a natureza dos raios catódicos.

~1890

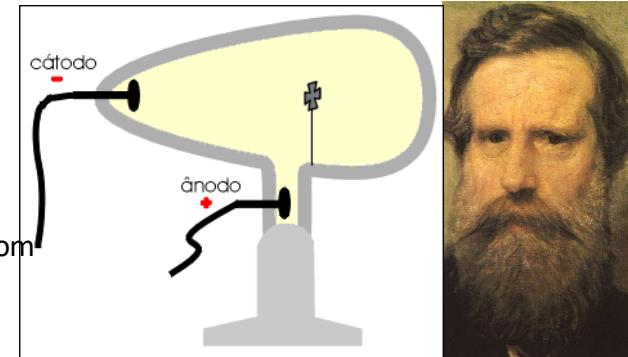
Nikola Tesla realiza descargas em rádio-frequência.

~1880

William Crookes descobre o plasma.

1866

M. Berthelot faz conversão de compostos orgânicos com descargas elétricas.



1857

Werner von Siemens desenvolve o ozonizador, a primeira aplicação de plasmas tecnológicos.



~1830

Michael Faraday estuda a descarga luminescente e discute a possibilidade de um quarto estado da matéria.

~1810

Ivan Petrov e Humpty Davy descobrem separadamente a descarga em arco.

1800

Henry Cavendish sintetiza H<sub>2</sub>O em descargas de H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>.

~1781  
~1780

Georg Christoph Lichtenberg primeiro gera os padrões de descarga elétrica em alta tensão que levam seu nome.



# Um pouco de história

Linha do tempo

2000

~2000

1950

1954

1980

1938

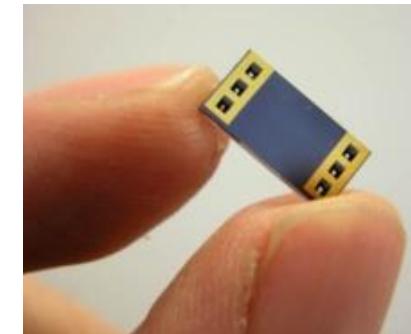
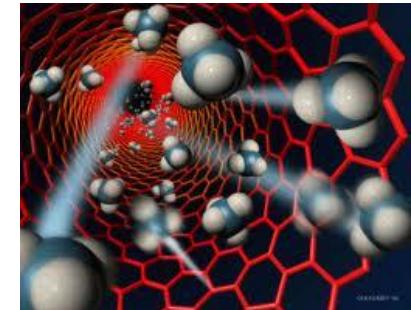
Atualmente, a tecnologia de plasma apresenta-se como uma ferramenta essencial para a manipulação do mundo micro/nanoscópico.

Só na Alemanha, bem mais de 200 empresas atuam no domínio da tecnologia de plasma de baixa temperatura.

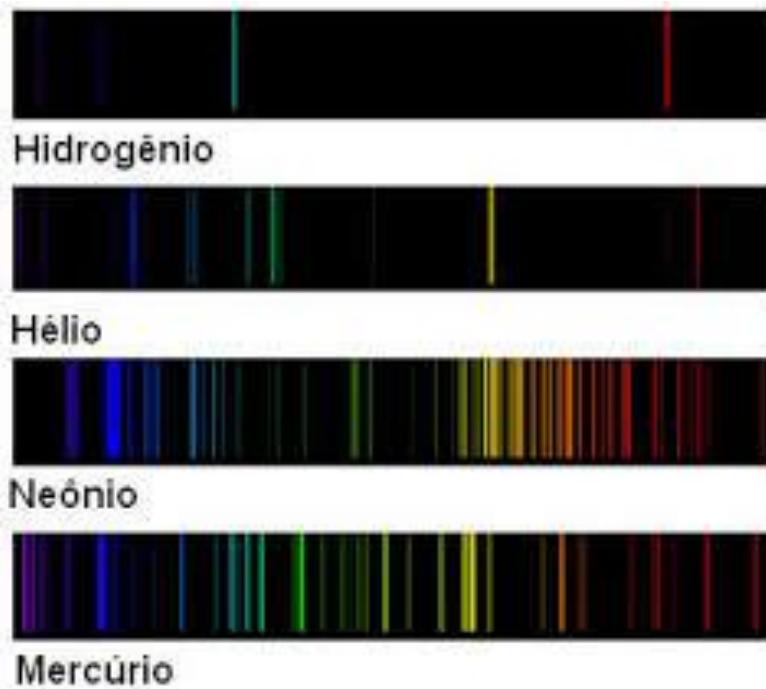
Processadores e chips são fabricados em áreas cada vez menores com o uso da tecnologia de plasmas.

H. Tracy Hall descobre diamantes como um produto de descargas elétricas em gás acetileno em altas temperaturas de processo (~2000°C).

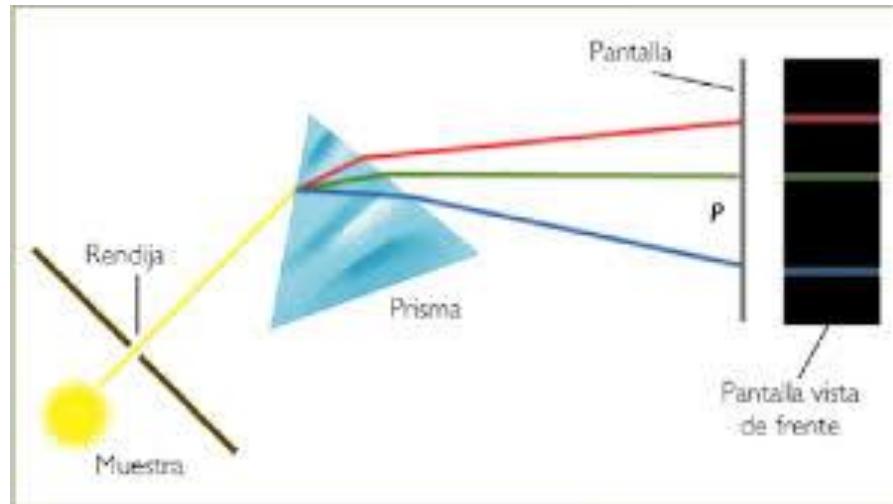
General Electric Co. inventa a lâmpada fluorescente. Esta é a primeira lâmpada de descarga elétrica em baixa pressão para fornecer luz branca e contínua.



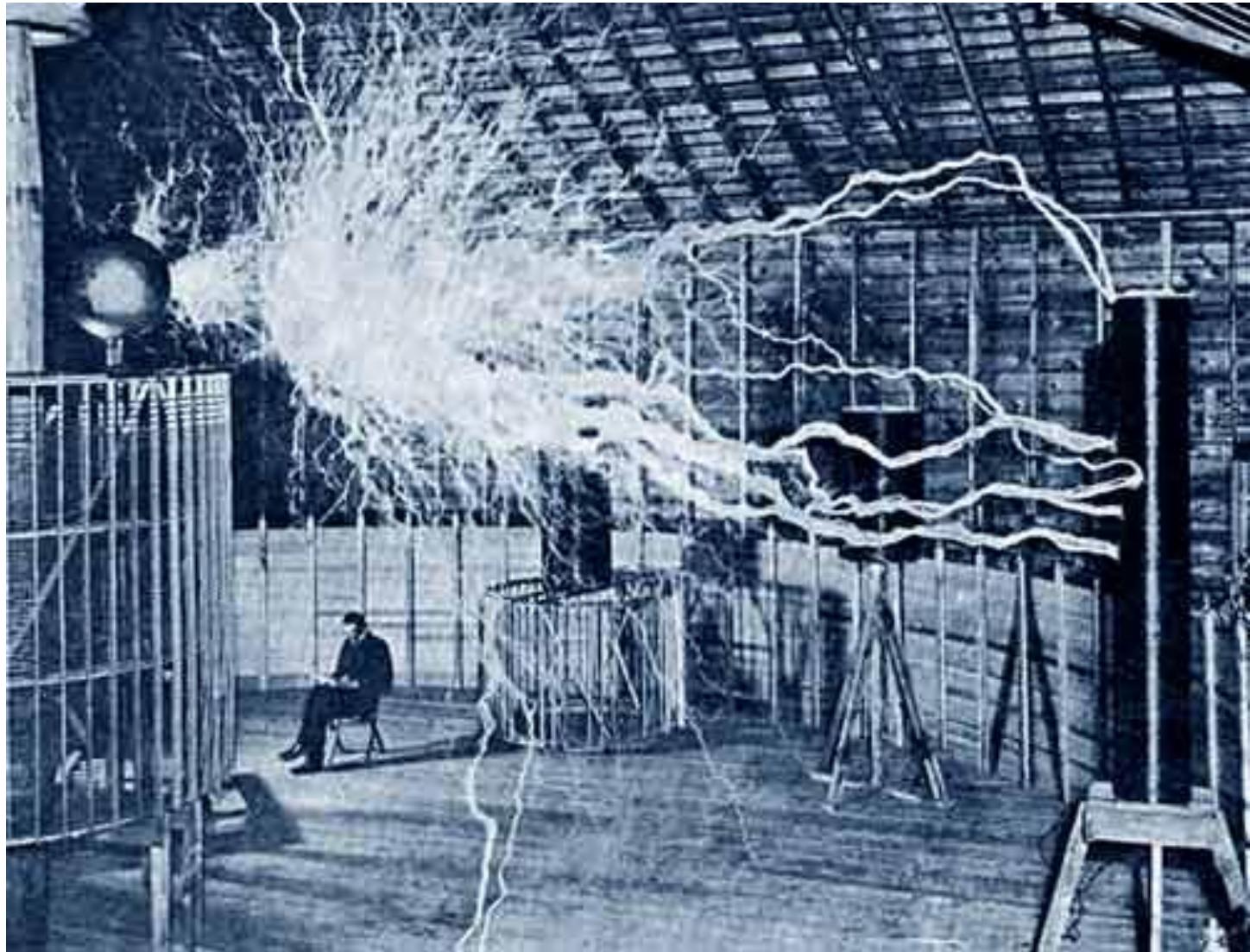
# Descargas elétricas e o desenvolvimento da Física Moderna



$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



# É absolutamente seguro



# FUNDAMENTOS

# Plasmas

Plasma é o quarto  
estado da matéria?

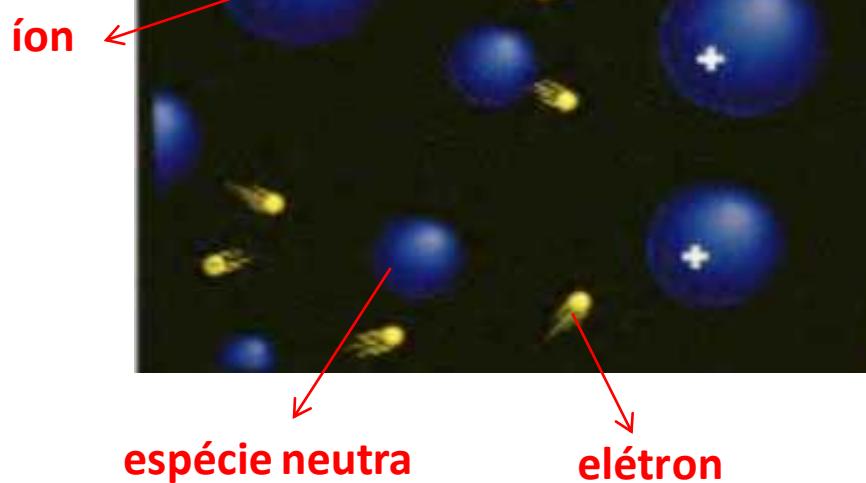
# Plasmas

→ Plasma (πλάσμα - “substância moldável”):



Meio altamente ionizado no qual as densidades de elétrons e íons são aproximadamente iguais.

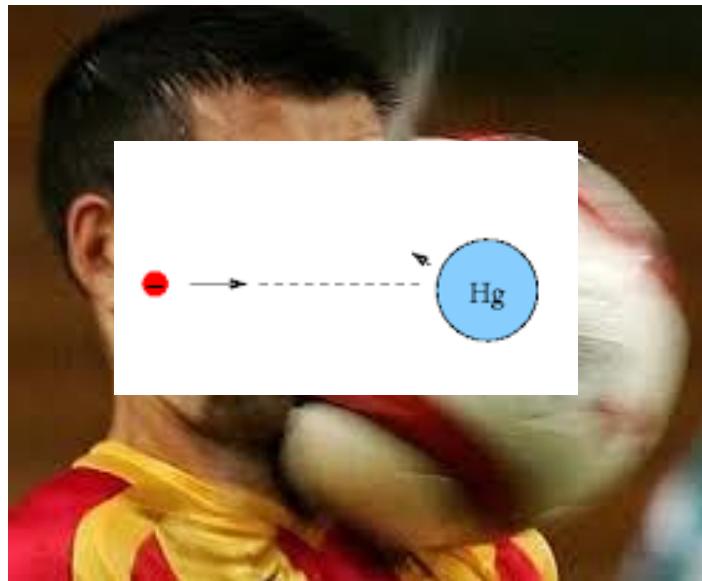
Definido em 1923 por Langmuir e Tonks quando estudo os gases.



# Espécies em um plasma

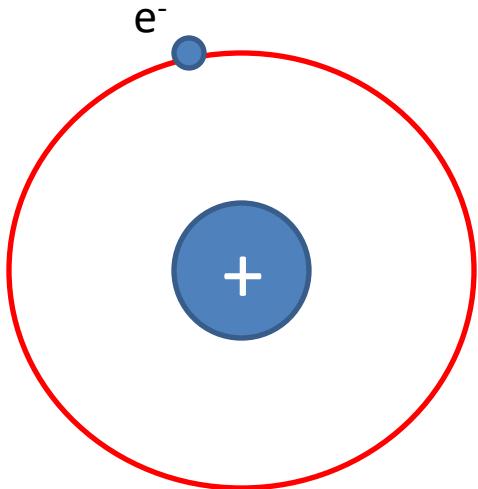
Um plasma é constituído por diversas espécies: partículas neutras, íons, elétrons e espécies excitadas.

Estas partículas colidem entre si, transferindo energia e momento umas para as outras.

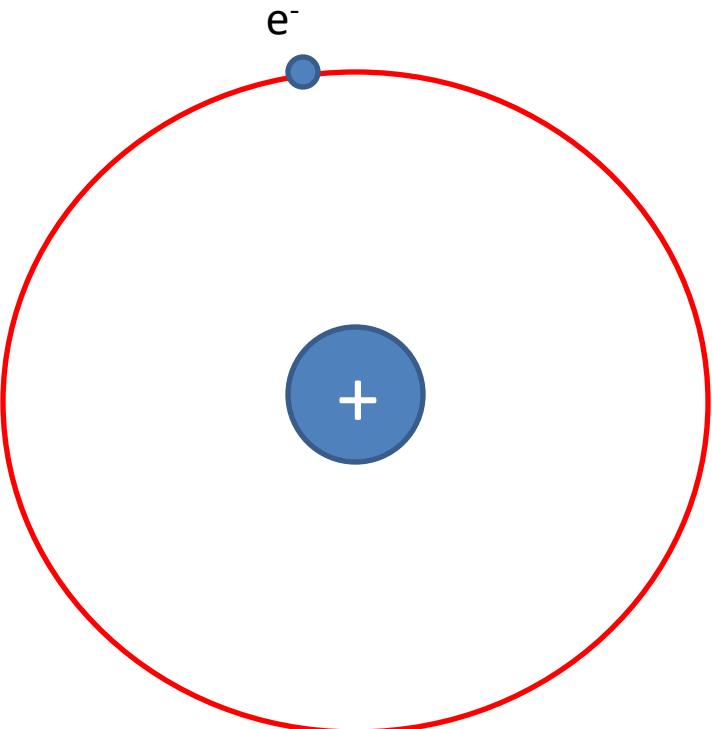


# Excitação e ionização

Excitação:

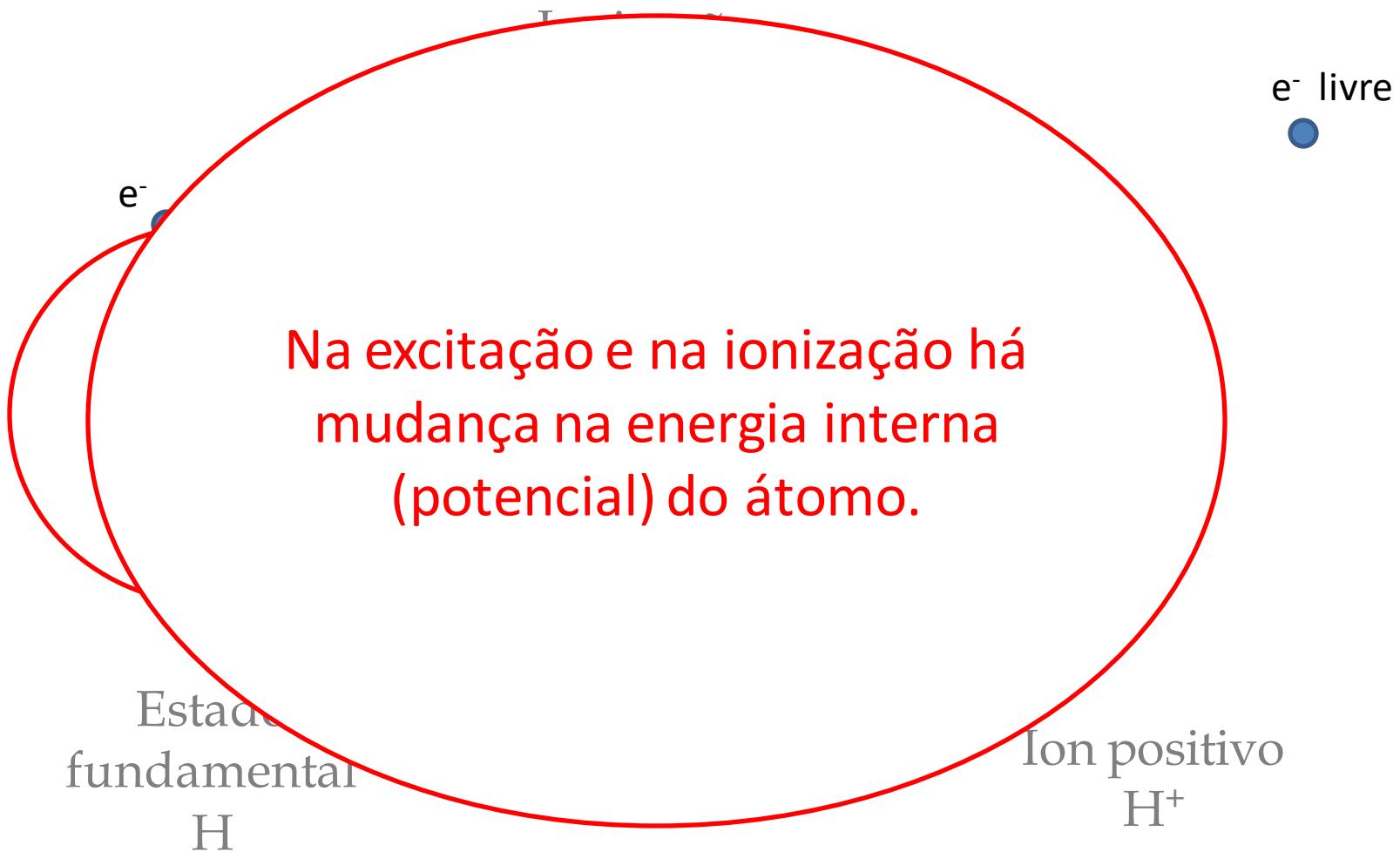


Estado  
fundamental  
 $H$

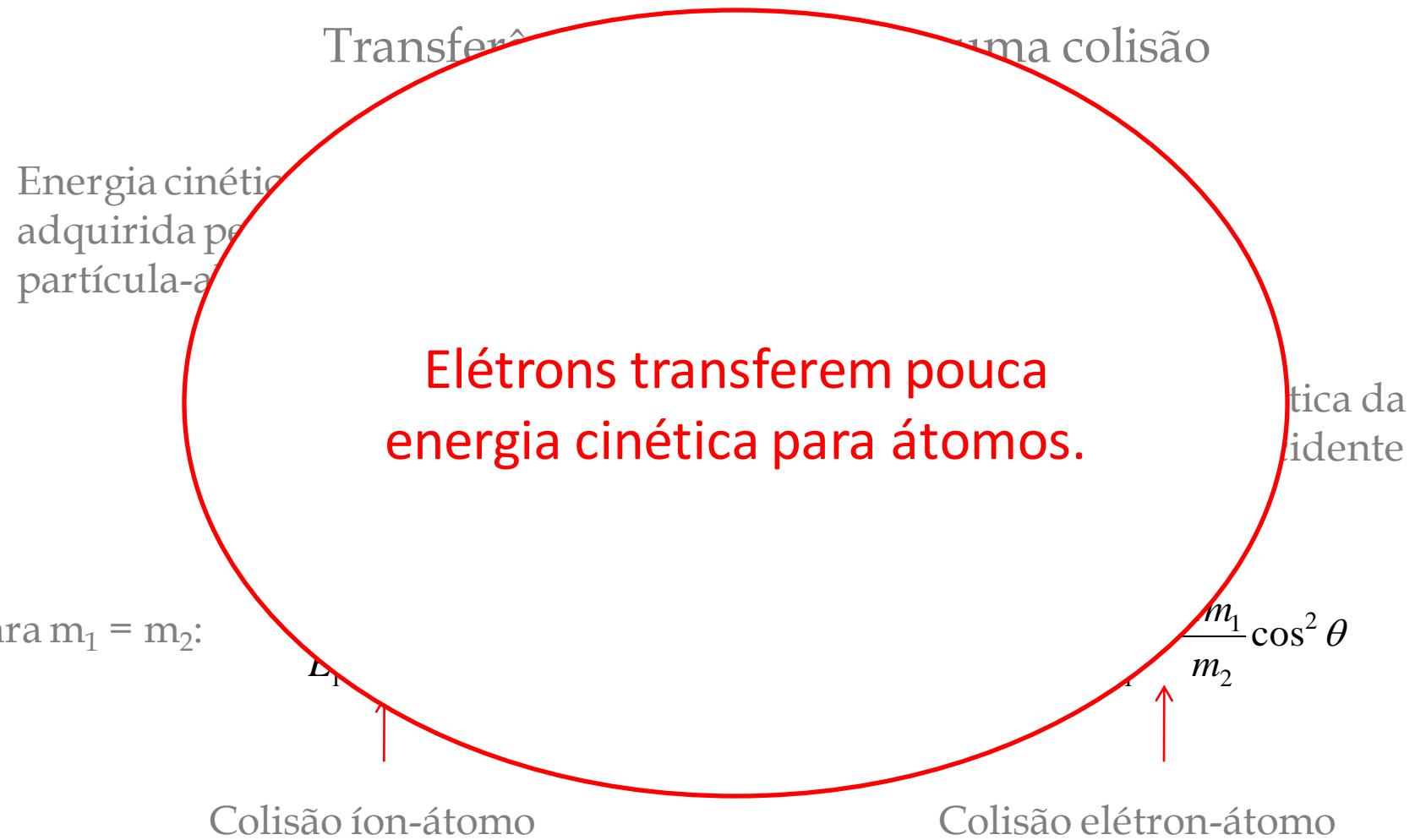


Estado excitado  
 $H^*$

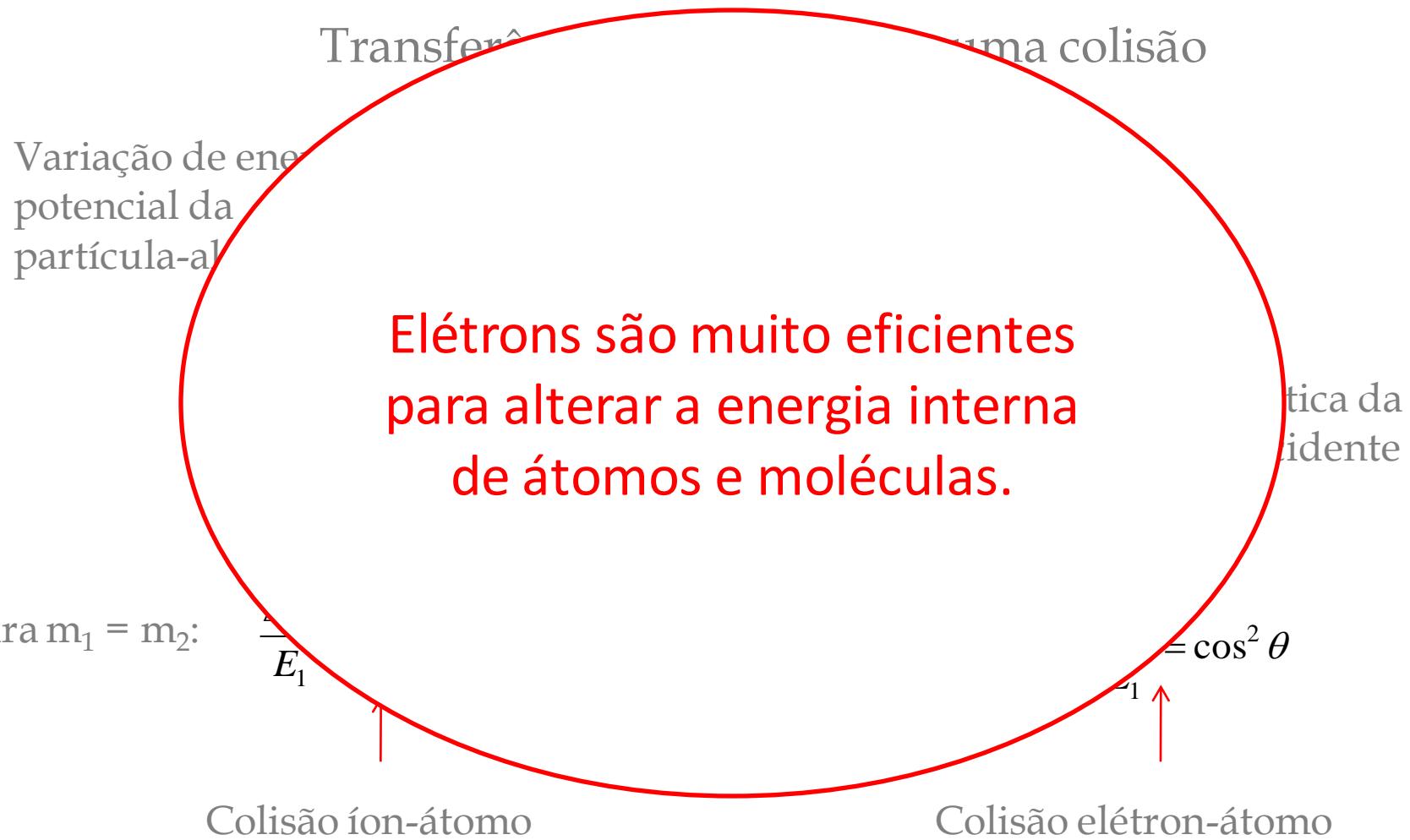
# Excitação e ionização



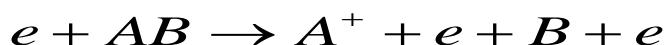
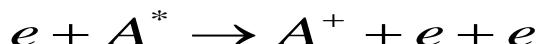
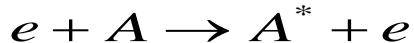
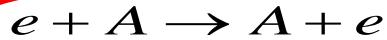
# Colisões elásticas e inelásticas



# Colisões elásticas e inelásticas



# Processos colisionais



Colisão elástica

Ionização por impacto eletrônico direto

Excitação/formação de metaestável

Desexcitação

Ionização por etapas

Dissociação

Ionização dissociativa

*Attachment* dissociativo

Recombinação no volume

*Attachment*

Recombinação radiativa

Transferência de carga (ressonante para B=A)

Colisão elástica

Excitação

Ionização

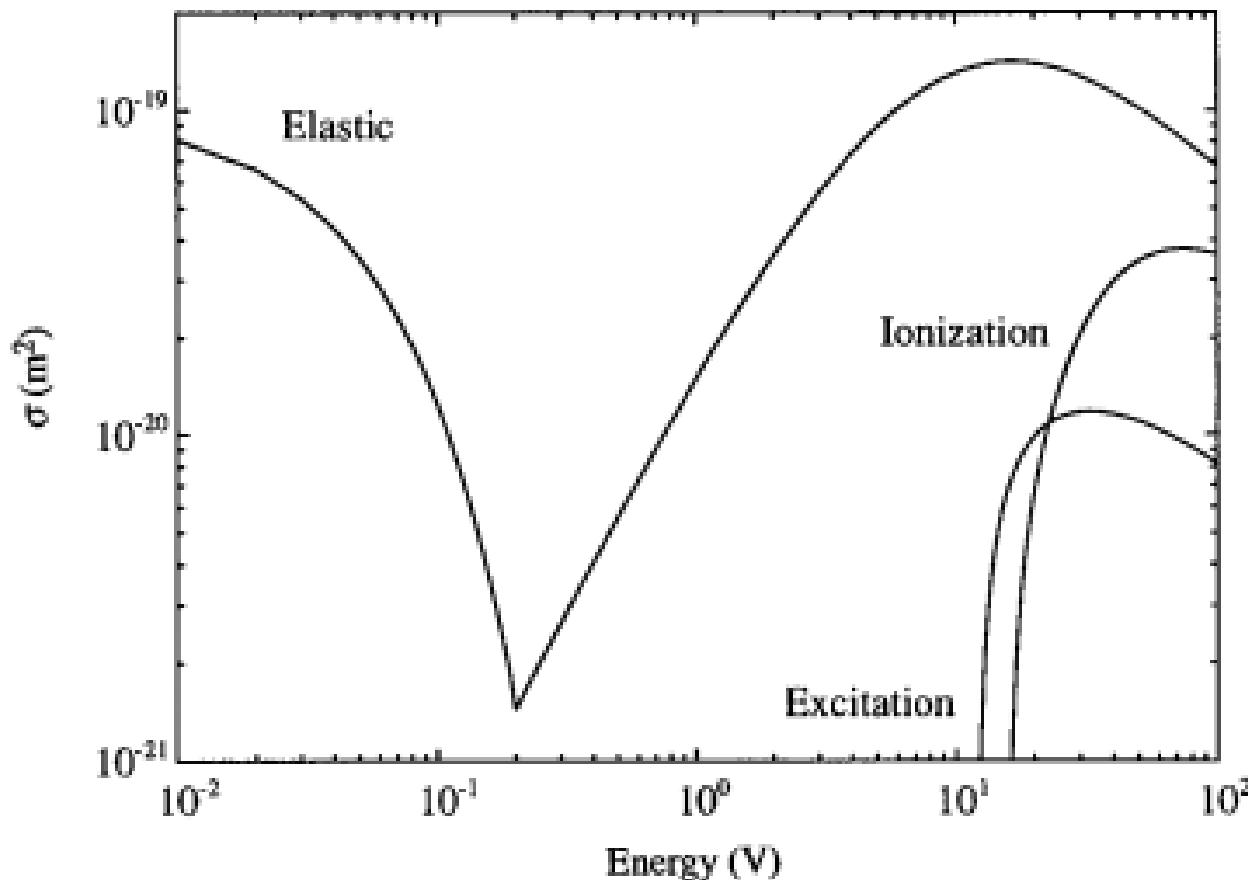
Ionização por efeito Penning

Dissociação

Oligomerização

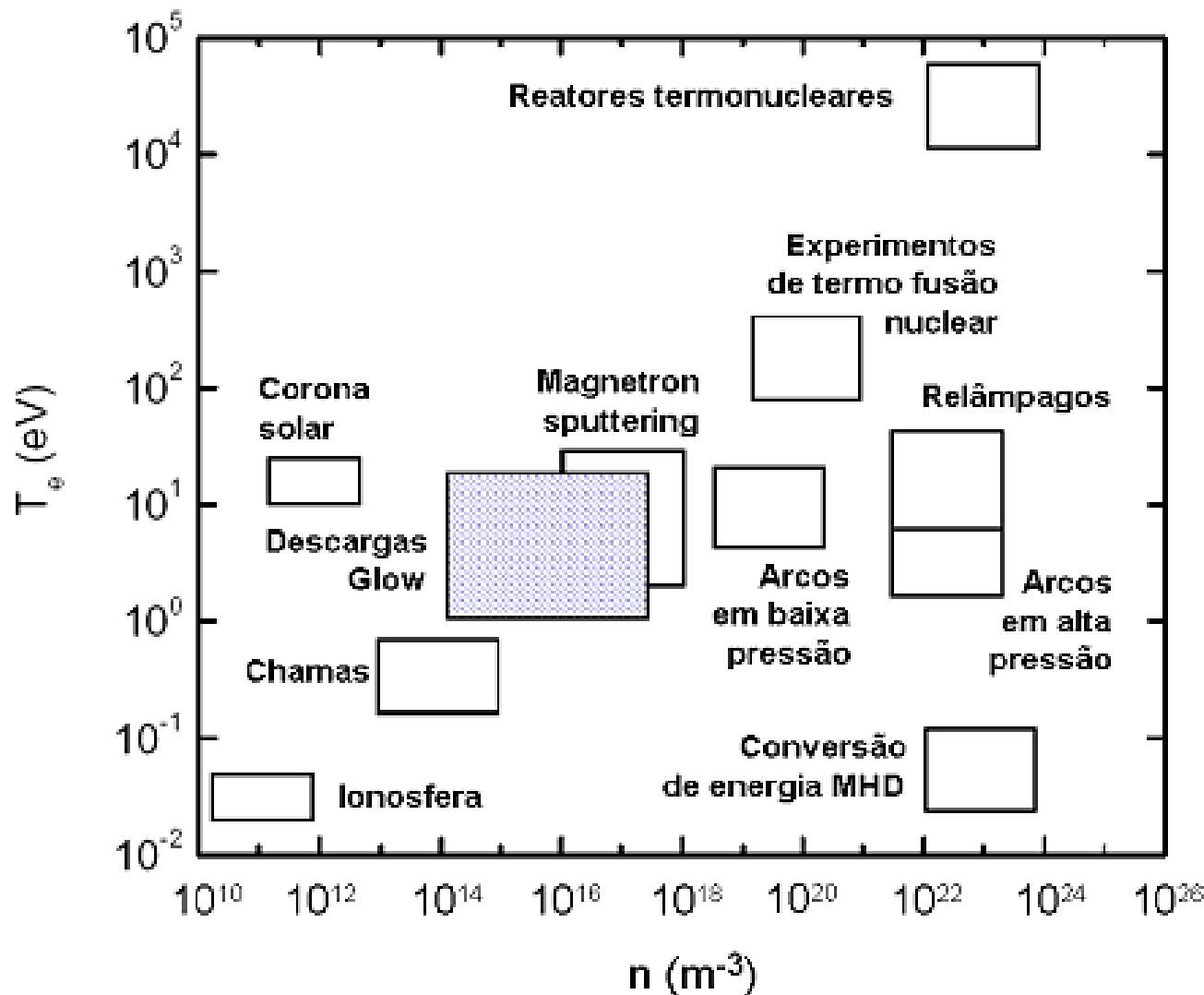
Oligomerização

# Seção de choque



**FIGURE 3.13.** Ionization, excitation and elastic scattering cross sections for electrons in argon gas (compiled by Vahedi, 1993).

# Propriedades de um plasma



# Densidade e temperatura

$$n = \frac{\text{partículas}}{\text{volume}}$$

$$T = \frac{2}{kf} \langle E_{cin} \rangle$$

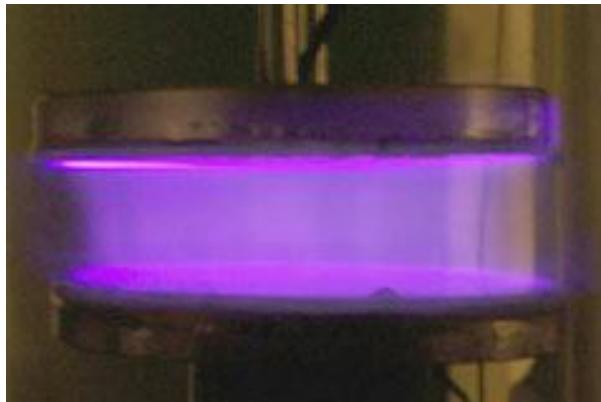
Na física de plasmas, a temperatura costuma ser dada em unidades de energia (eV). Neste caso, o termo temperatura se refere ao produto  $kT$ .

# Classificação de plasmas: frio e quente



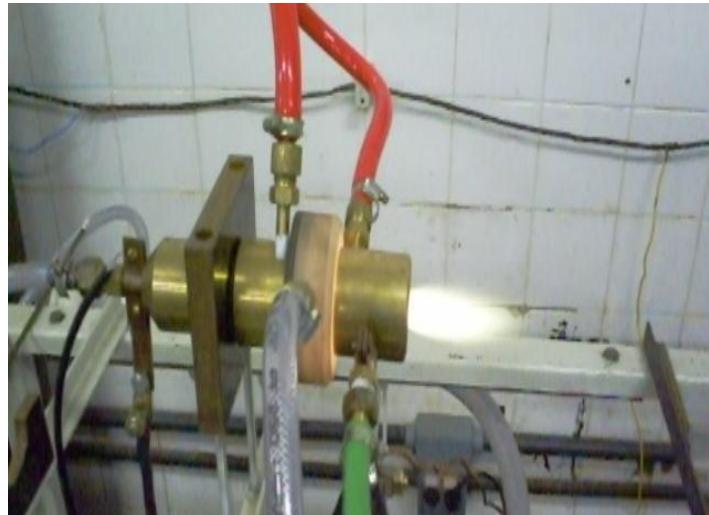
Quente  
 $\alpha = 1$

$$\alpha = \frac{n_e}{n_{total}}$$



Frio  
 $\alpha \ll 1$

# Classificação de plasmas: térmico e não-térmico



Térmico

Equilíbrio Termodinâmico local

$$T_e \approx T_i \approx T_g$$

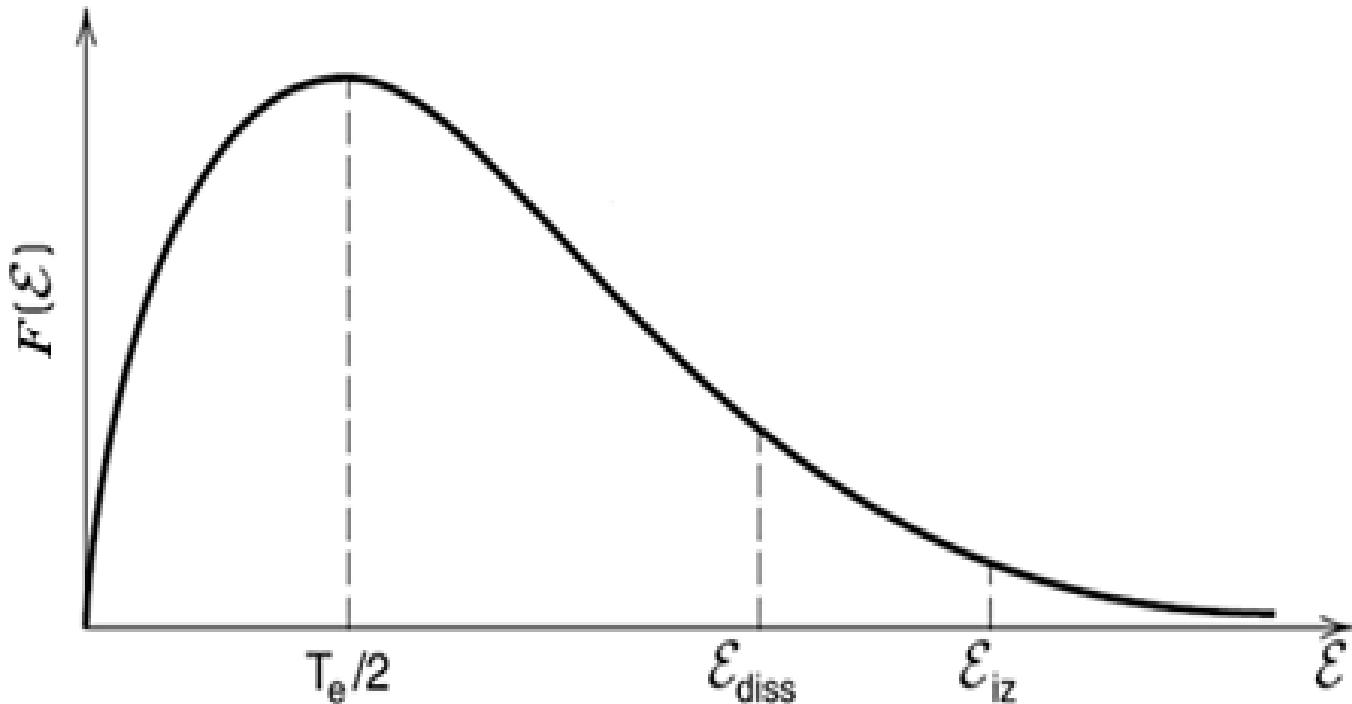


Não-térmico

Fora do equilíbrio termodinâmico

$$T_e \gg T_i \approx T_g$$

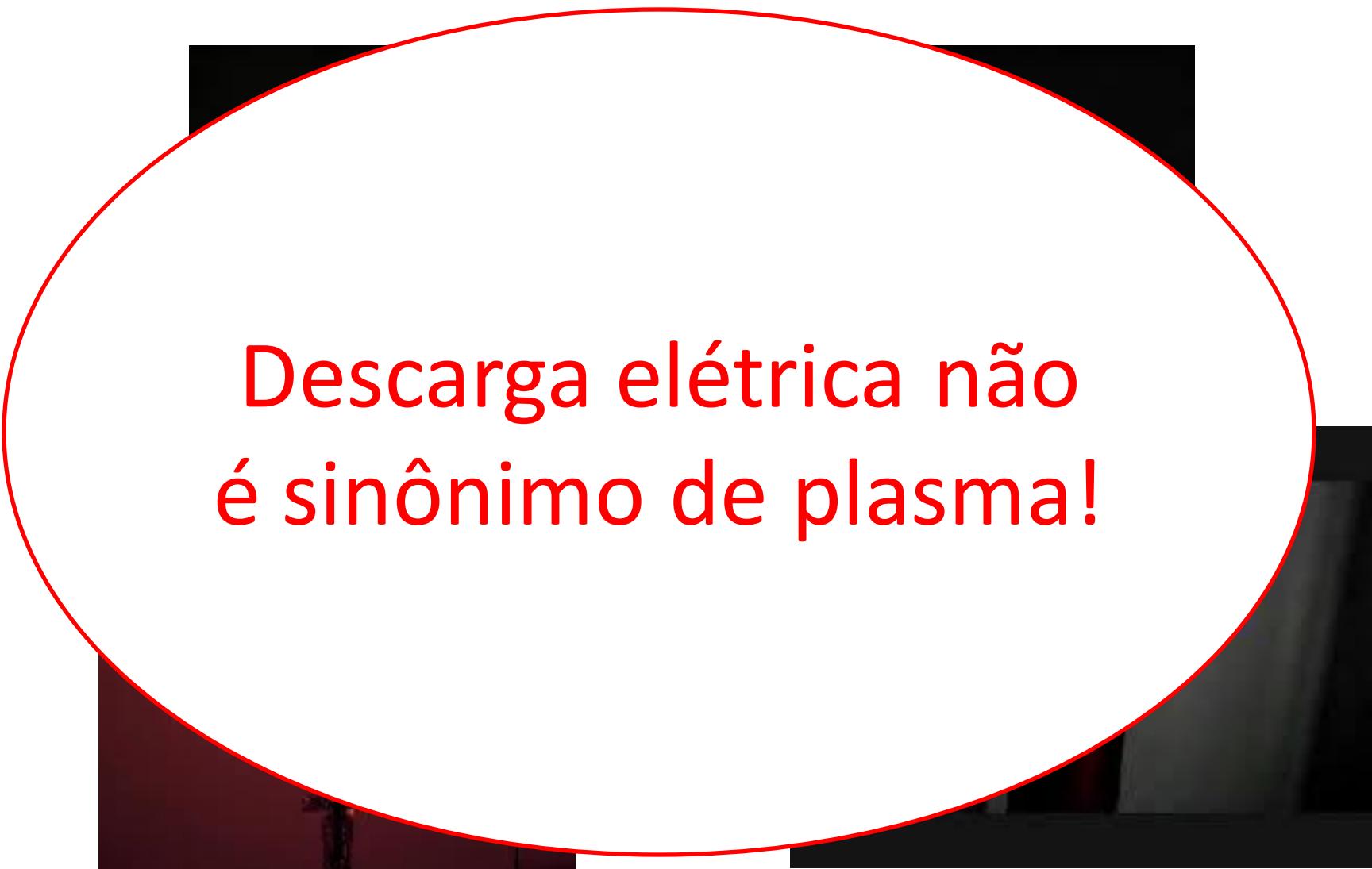
# Função distribuição de energia



$$F(E) = 2 \left( \frac{1}{kT} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{E}{\pi}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

Maxwell-Boltzmann

# Descargas elétricas em gases



Descarga elétrica não  
é sinônimo de plasma!

# Definição formal de plasma

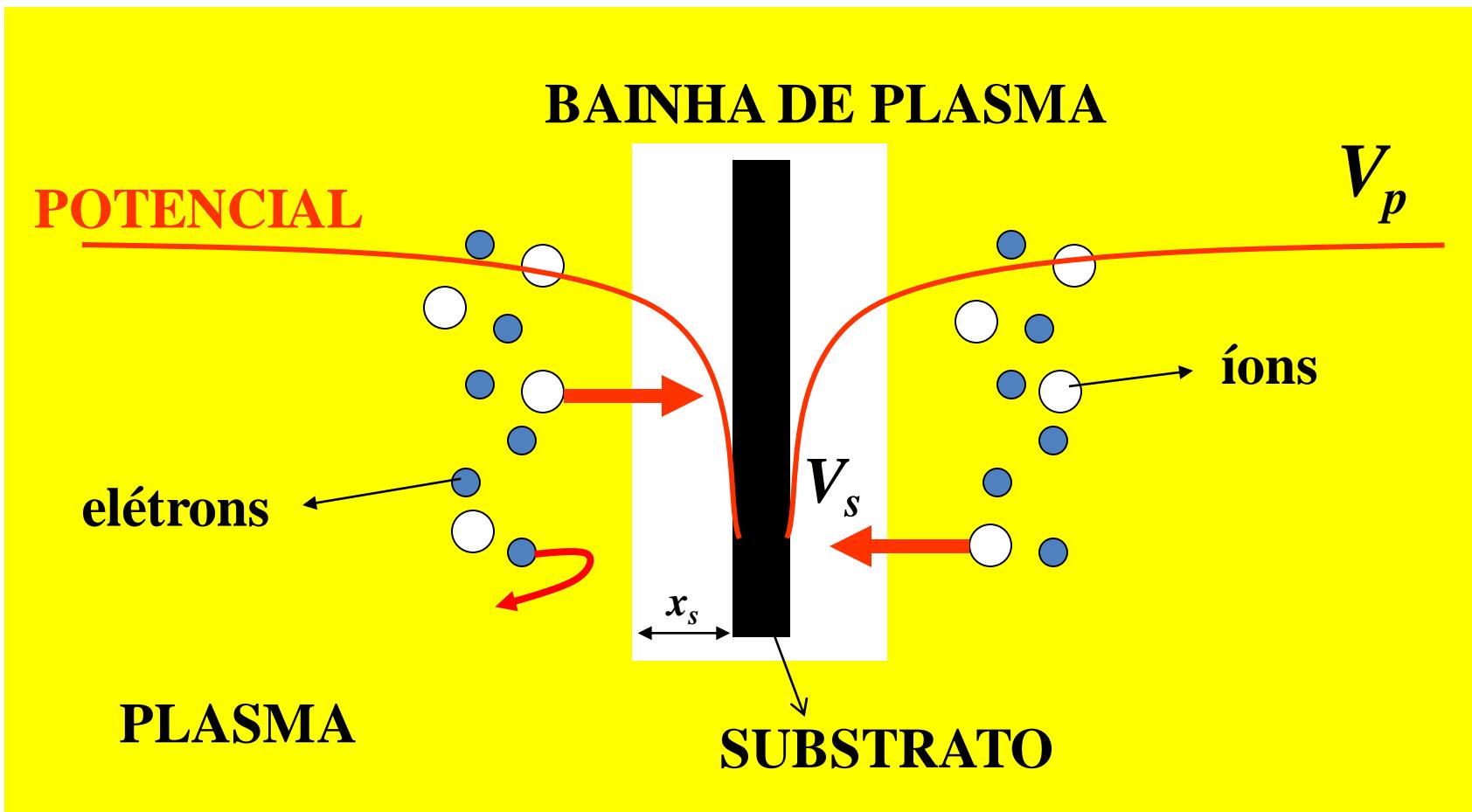
Condição de *quasi-neutralidade*:

$$n_+ \approx n_-$$

Blindagem:

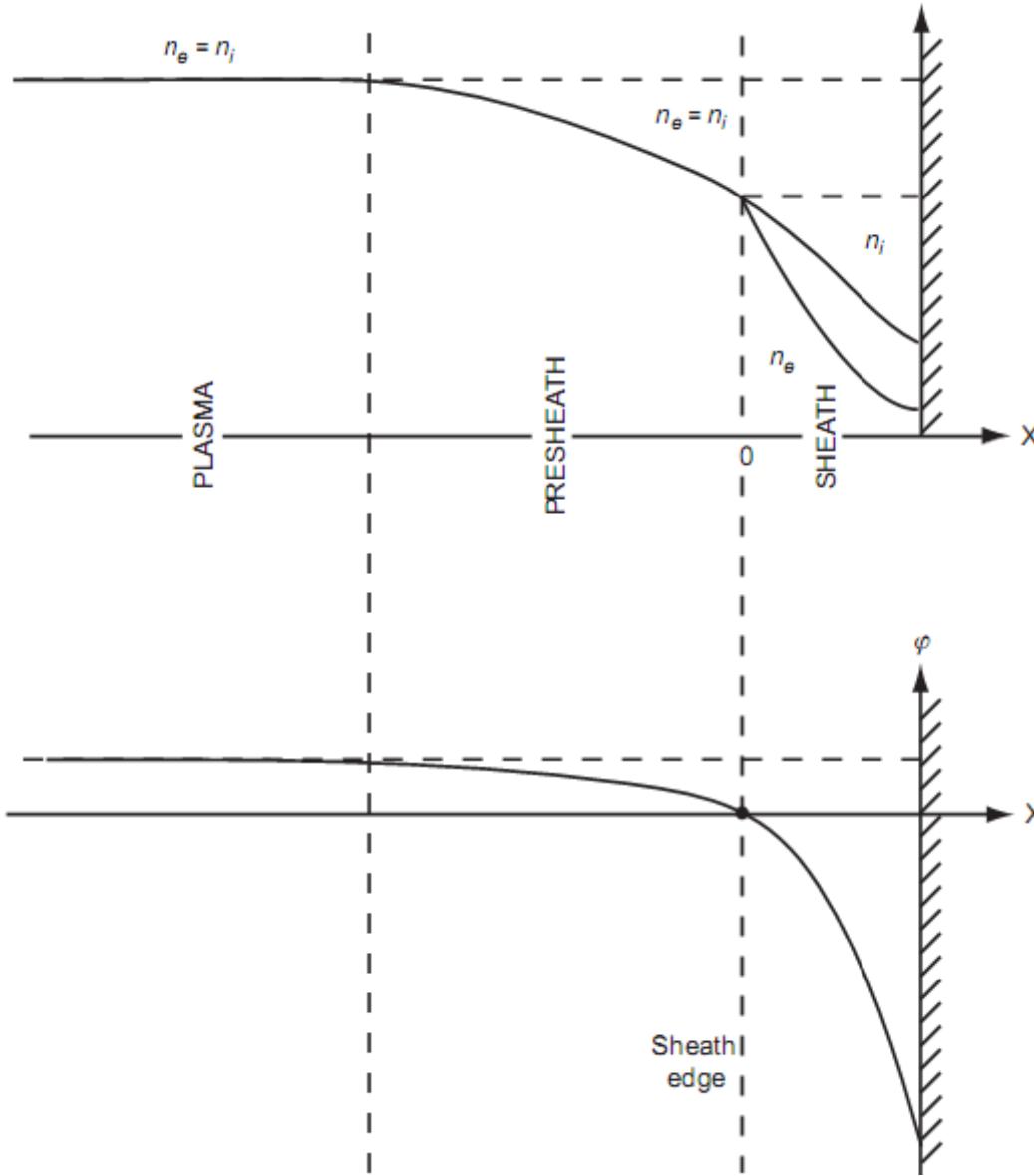
$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \ll L$$

# Comprimento de Debye e bainha de plasma

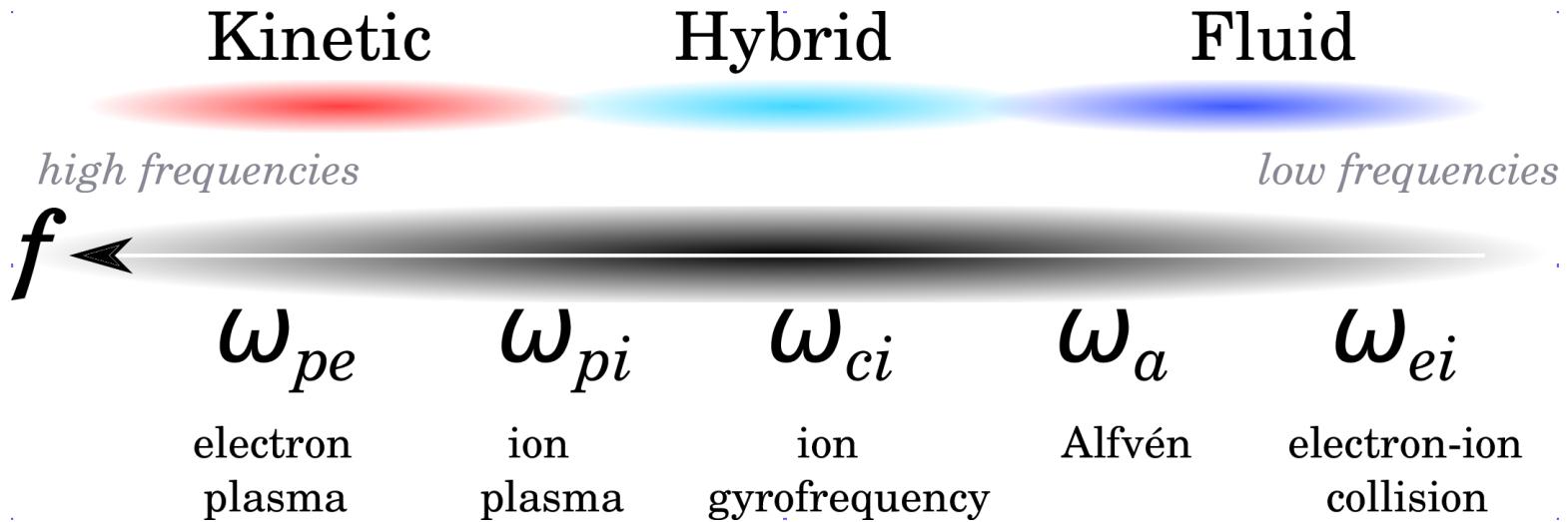


É na região de bainha onde ocorrem as reações de interação plasma-superfície!

# Bainha de plasma

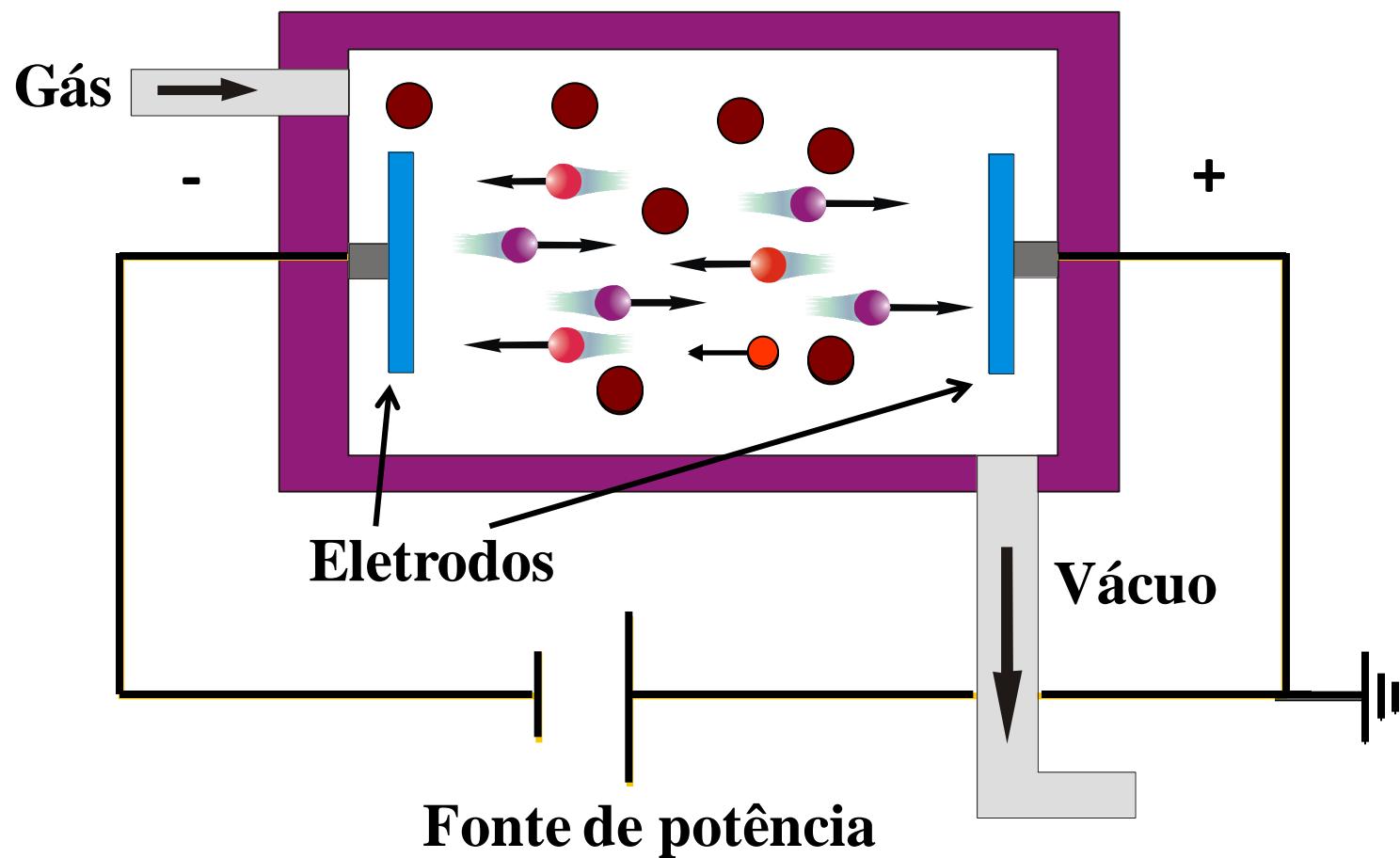


# Frequênciac de plasma



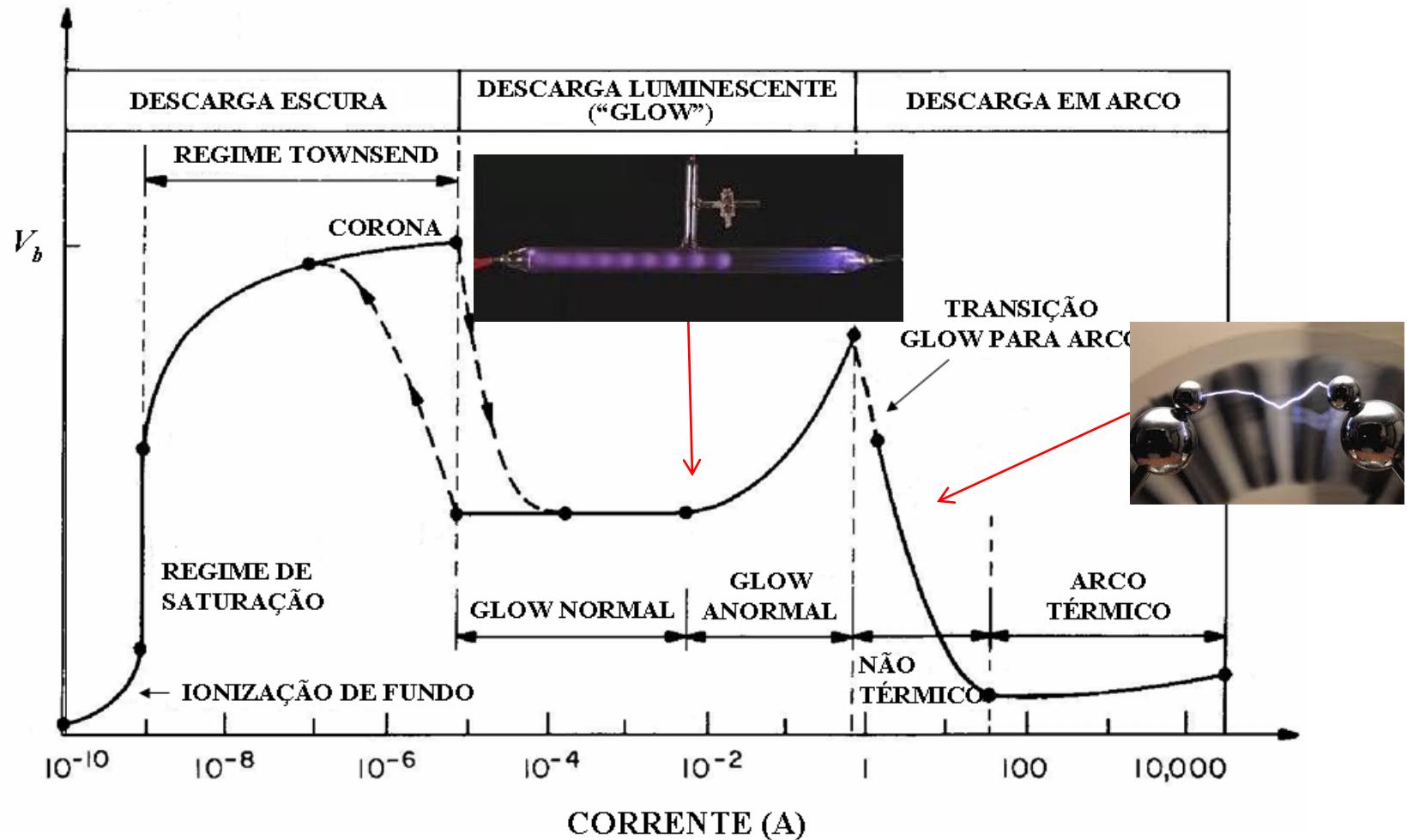
$$\omega_{pe} = \left( \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}$$

# Como gerar um plasma?

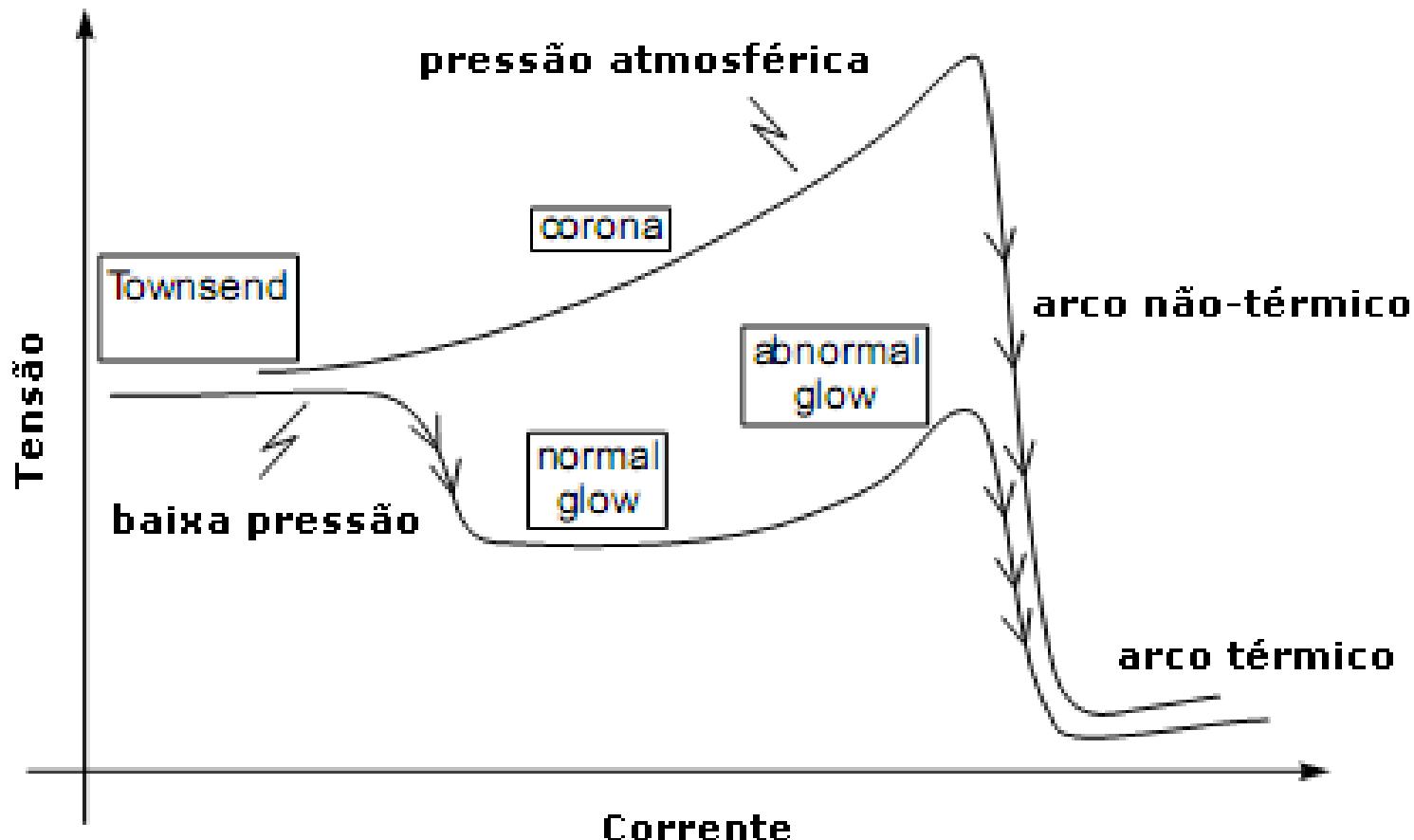


# Como gerar um plasma?

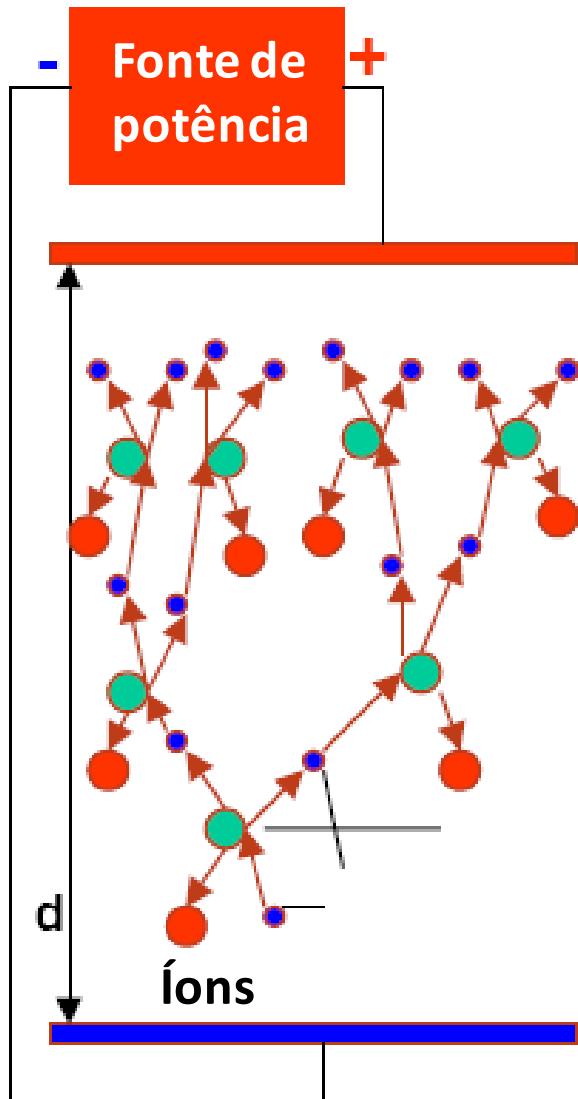
TENSÃO (V)



# Como gerar um plasma?



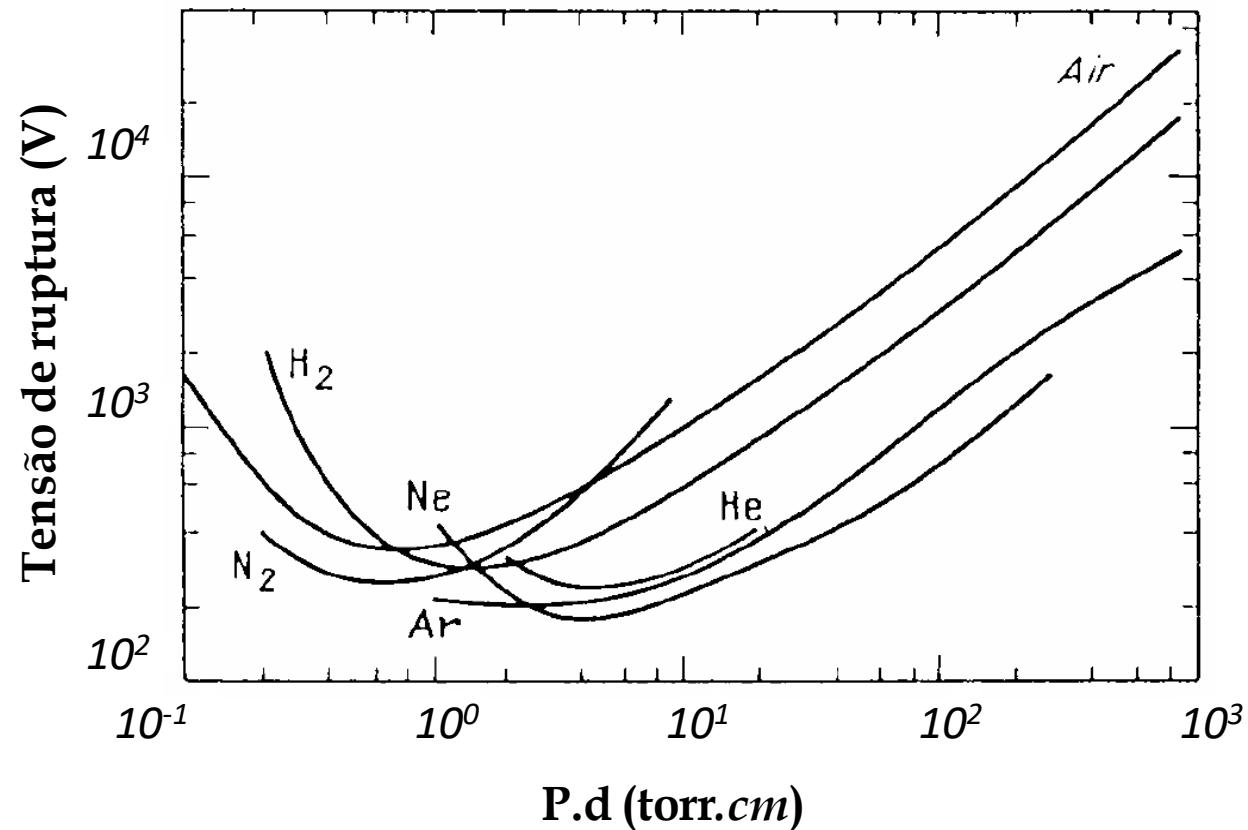
# Descarga de Townsend



- Descargas de Townsend ocorrem quando os elétrons livres adquirem (entre duas colisões sucessivas) energia maior do que a energia de ionização do gás.
- Os elétrons causam ionização, gerando novos elétrons, que também podem causar mais ionizações, levando então ao processo de avalanche.
- O número de elétrons cresce exponencialmente com a distância entre os eletrodos.

$$dn = \alpha n dx$$

# Descarga DC: Lei de Paschen



- Em baixa pressão a tensão de ruptura depende apenas do **produto P.d**

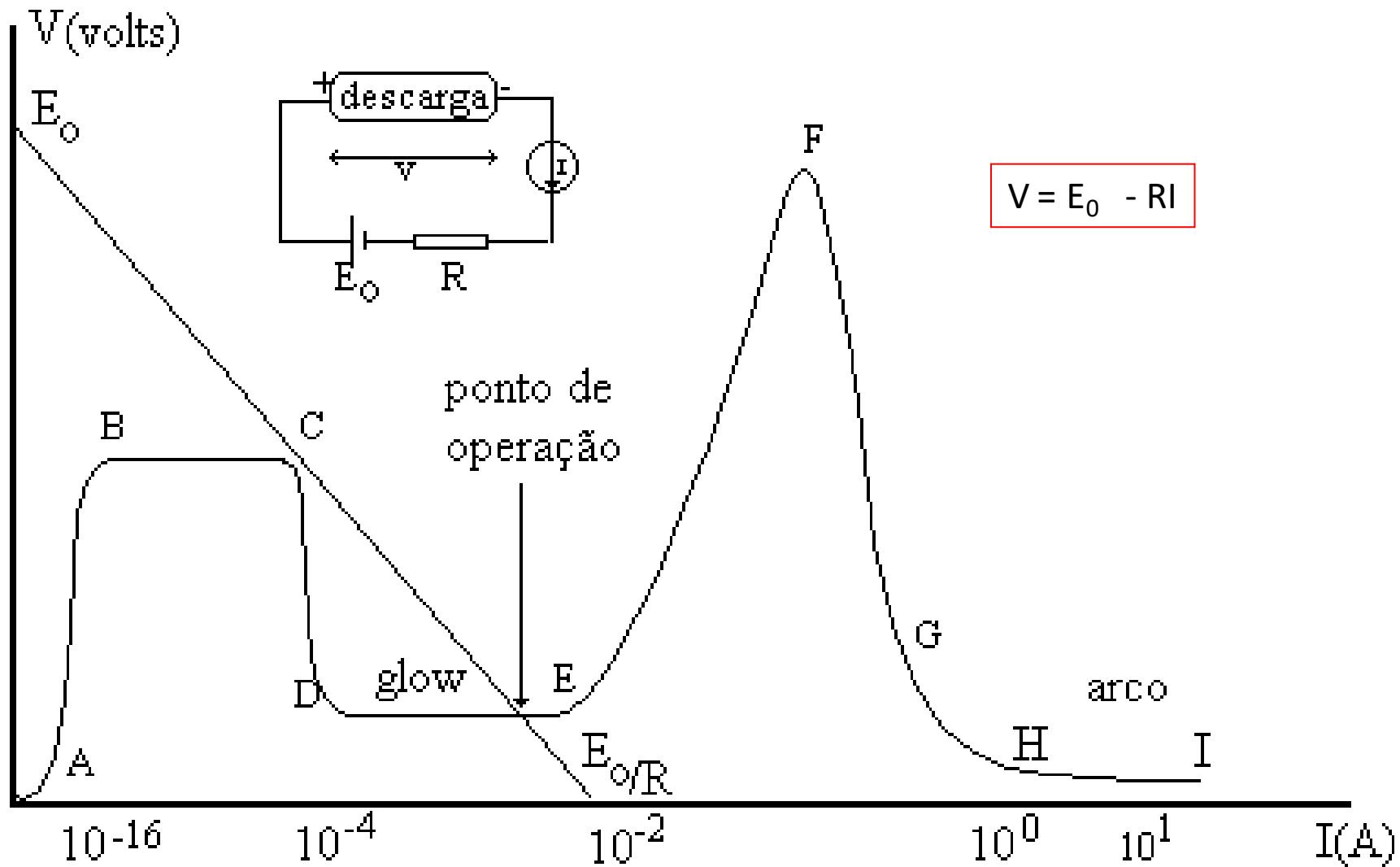
$$V_b = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1+1/\gamma)}}$$

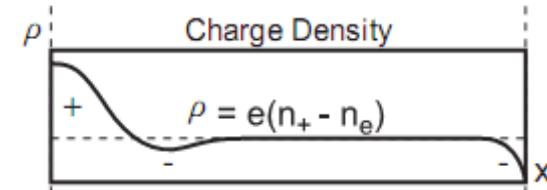
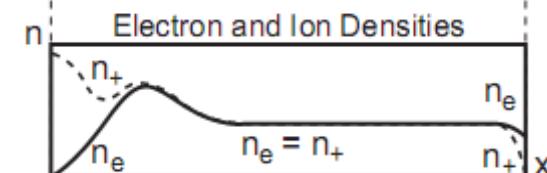
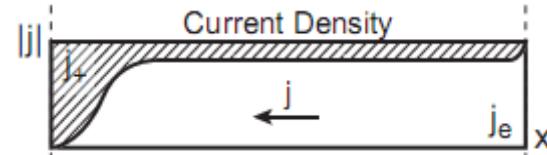
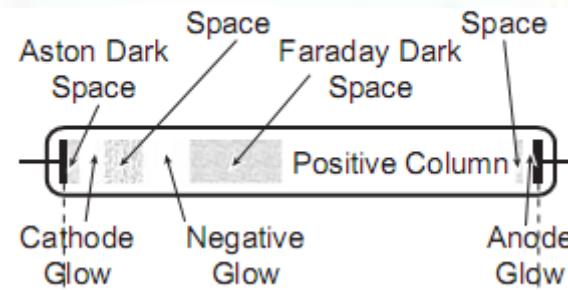
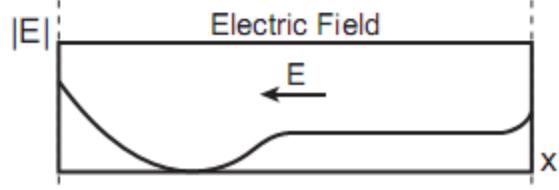
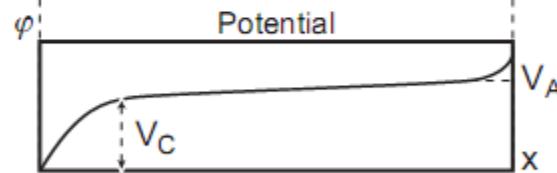
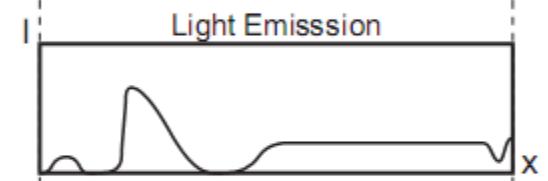
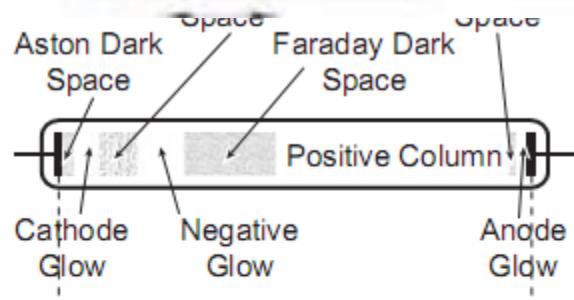
- A tensão de ruptura mínima e o correspondente valor de P.d depende do gás e do **coeficiente de emissão de elétrons secundários ( $\gamma$ )** do material.

$$(V_b)_{\min} = e \frac{B}{A} \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

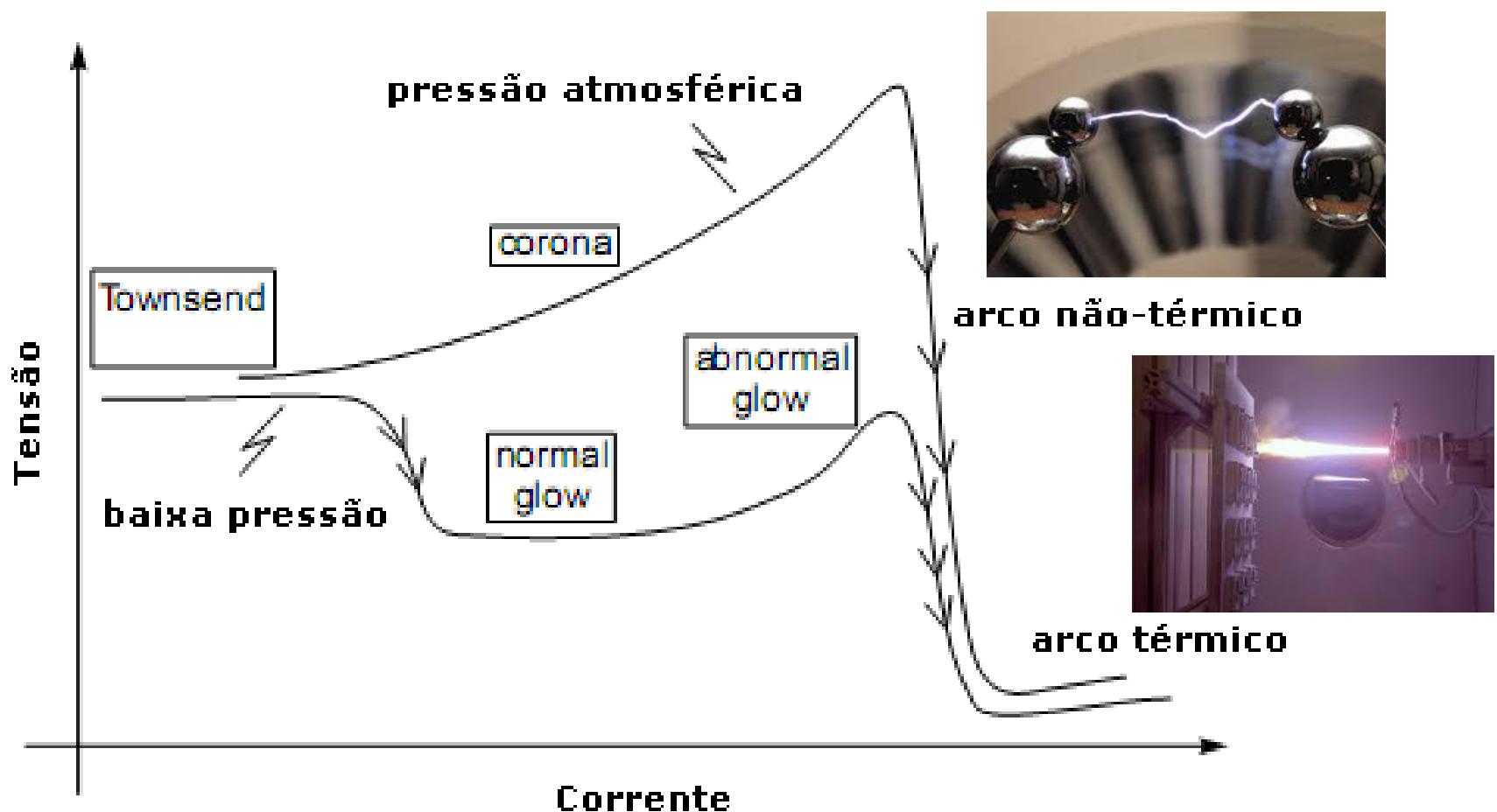
$$(P.d)_{\min} = \frac{e}{A} \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

# Reta de carga e ponto de operação

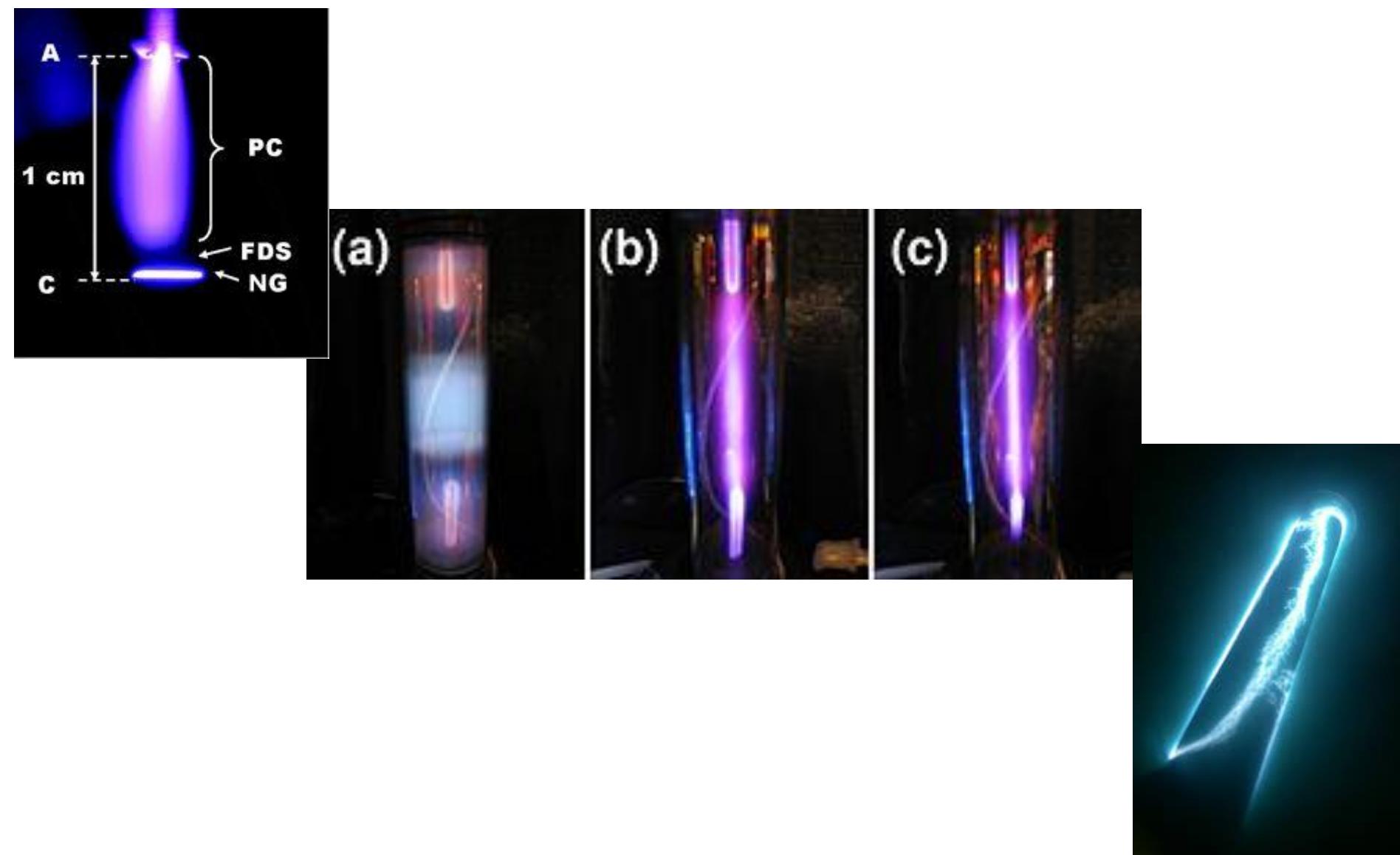




# Descarga em arco – pressão atmosférica

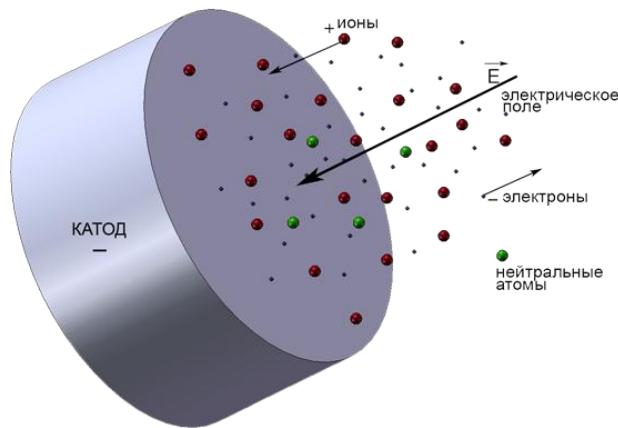


# Transição *glow* para arco

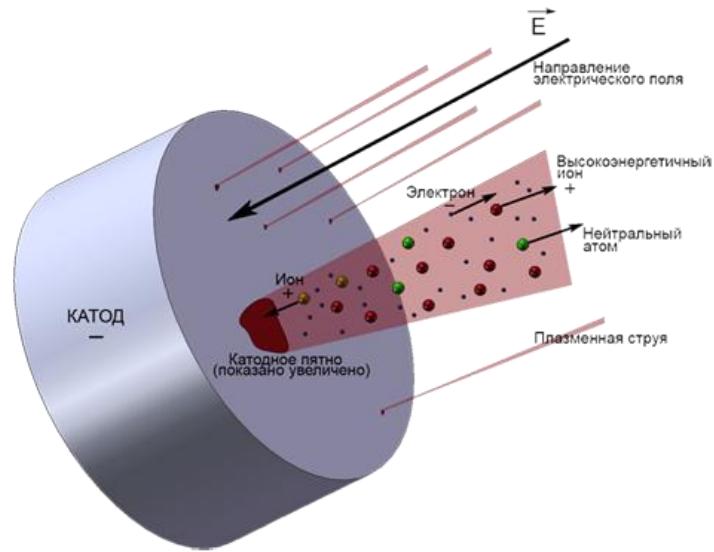


# Descarga em arco

- Descarga luminescente



- Descarga em arco



- Cátodos quentes (W, Mo, etc): aguentam alta temperatura
- Cátodos frios (Cu, Al, etc): metal vaporiza no “pé do arco”. O arco “dança” sobre a superfície.
- Compatibilidade cátodo e gás é importante.

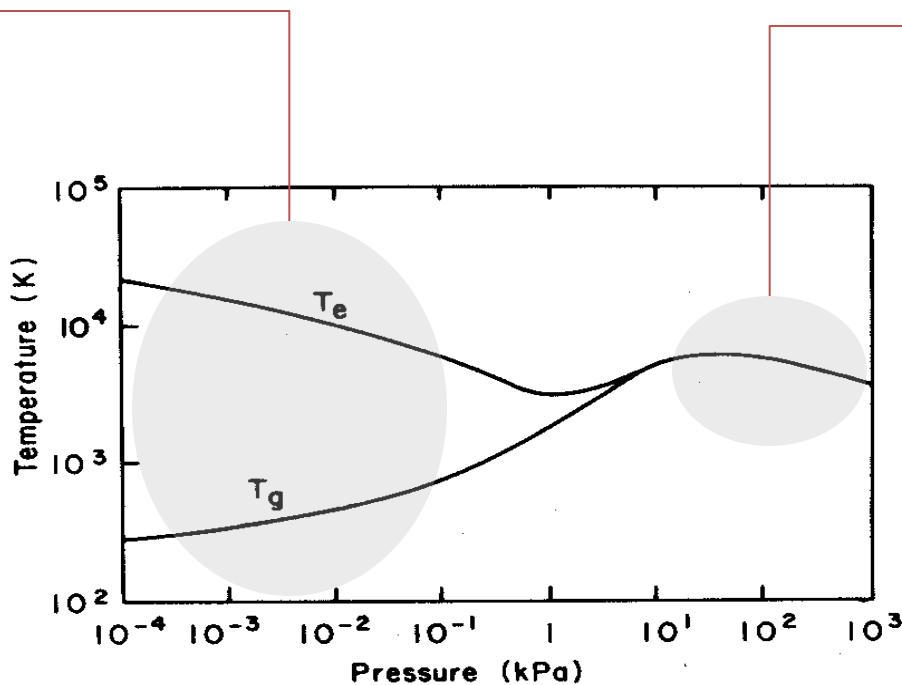
# Arcos térmicos e não-térmicos

## ➤ Plasmas não-térmicos

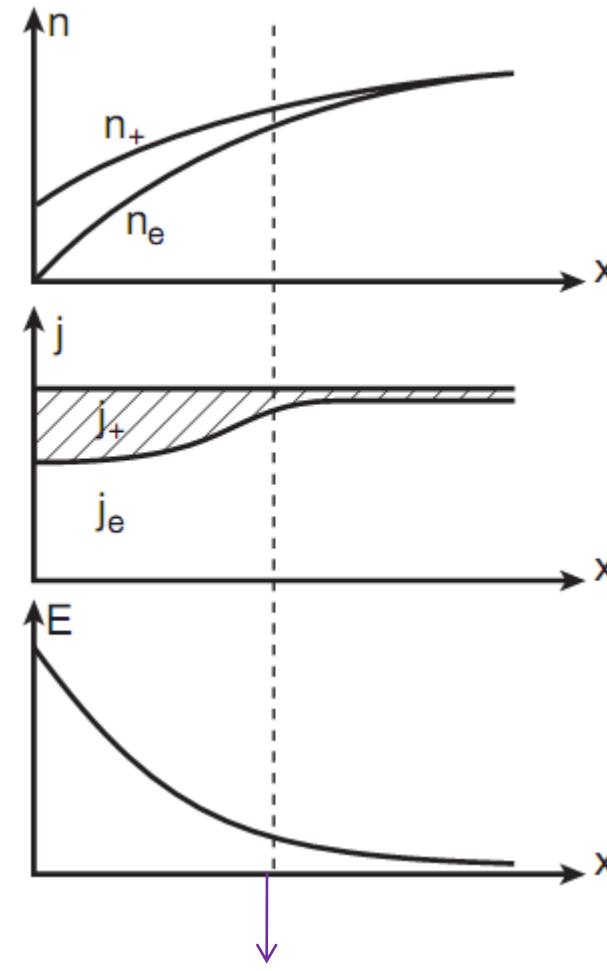
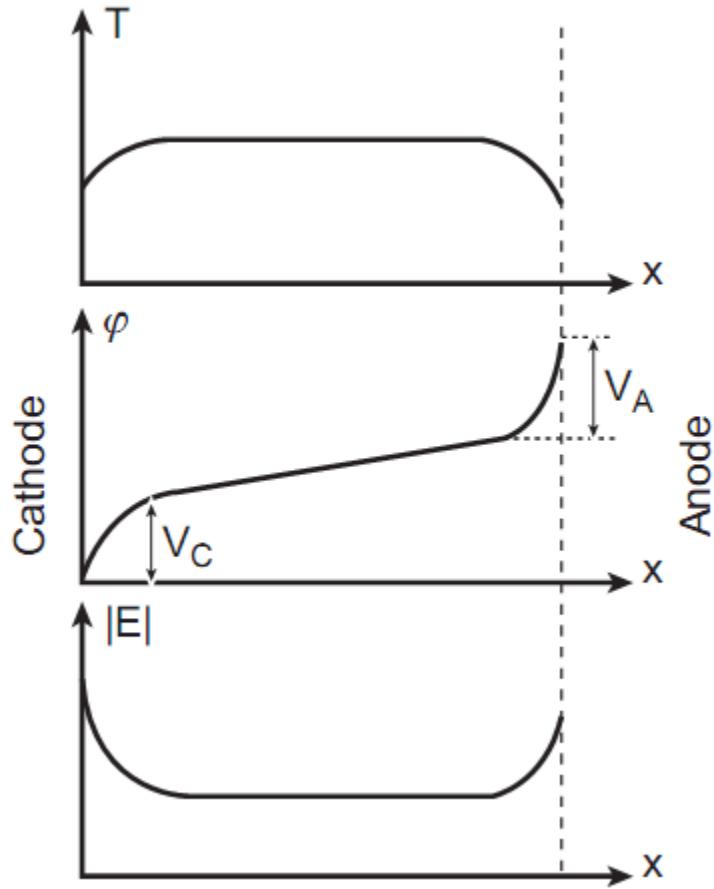
- ✓ Fora do equilíbrio termodinâmico
- ✓ Ionização por impacto eletrônico
- ✓ Seletividade química

## ➤ Plasmas térmicos

- ✓ Equilíbrio termodinâmico
- ✓ Aquecimento do gás
- ✓ Equipartição de energia



# Descarga em arco



Cathode sheath

# Descargas em rádio-frequência

## CARACTERÍSTICAS

Descargas com eletrodos **dielétricos**  
ou sem eletrodos

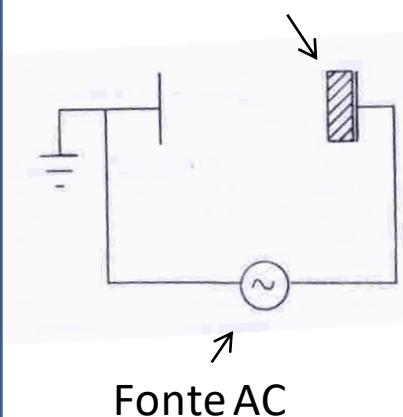


Descargas DC são rapidamente extinguidas

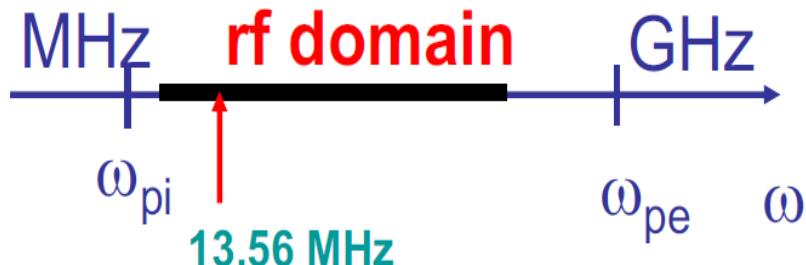


Solução: alternar o campo elétrico em uma frequência  $f$

Eletrodo isolante



- Em frequências > 100kHz, os **elétrons acompanham o campo e os íons não**.



$$\omega_{pe} = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2} = 5.64 \times 10^4 n_e^{1/2} \text{ rad/s}$$

$$f_{pe} \approx 8980\sqrt{n_e} \text{ (Hz)}$$

$$\omega_{pi} = (4\pi n_i Z^2 e^2 / m_i)^{1/2} = 1.32 \times 10^3 Z \mu^{-1/2} n_i^{1/2} \text{ rad/s}$$

onde:  $\mu = m_i/m_p$

# Descargas em rádio-frequência

## CARACTERÍSTICAS

Descargas com eletrodos metálicos ou **dielétricos**  
ou sem eletrodos

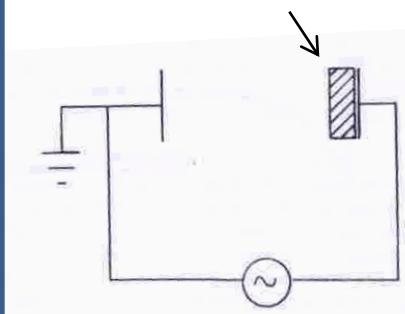


Descargas DC são rapidamente extinguidas



Solução: alternar o campo elétrico em uma frequência  $f$

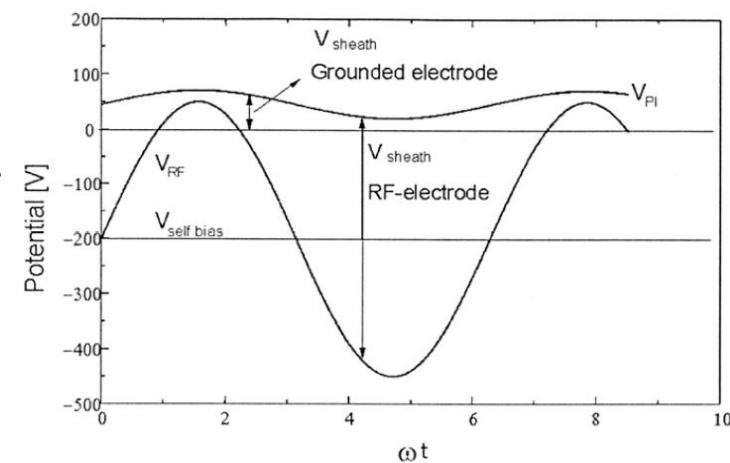
Eletrodo isolante



AC power supply

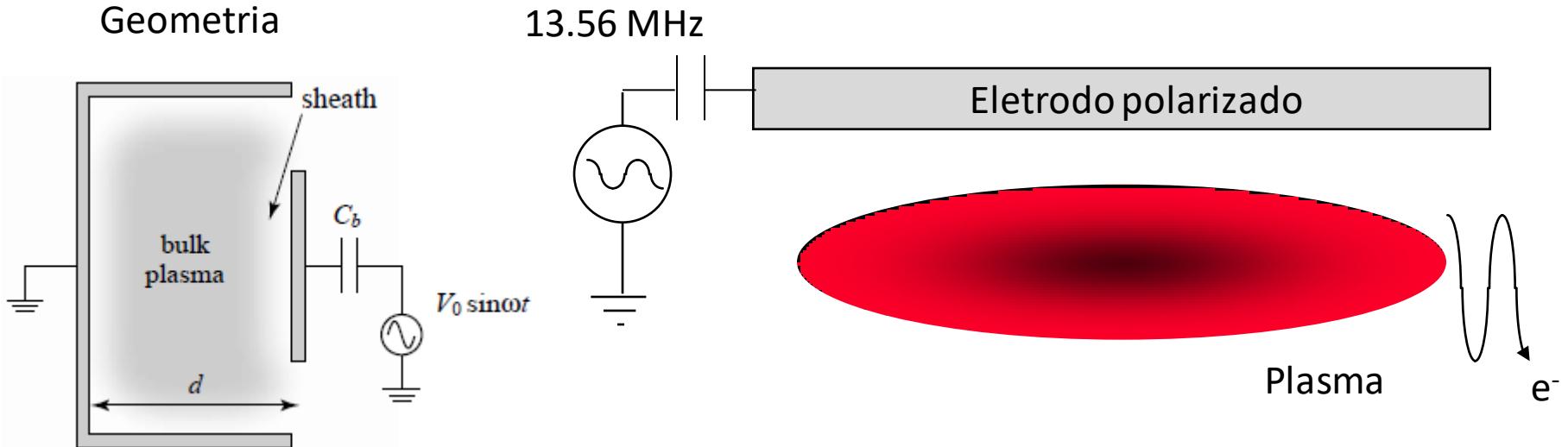
- Em frequências  $> 100\text{kHz}$ , os **elétrons acompanham o campo e os íons não**.

- Em frequências  $> 100\text{kHz}$ , o campo alternado faz os elétrons oscilar e adquirir energia suficiente para causar colisões ionizantes, reduzindo assim a dependência da descarga com os elétrons secundários → **diminuição da tensão de ruptura da descarga**.



# Descargas em rádio-frequênciā

## Acoplamento capacitivo(CCP)

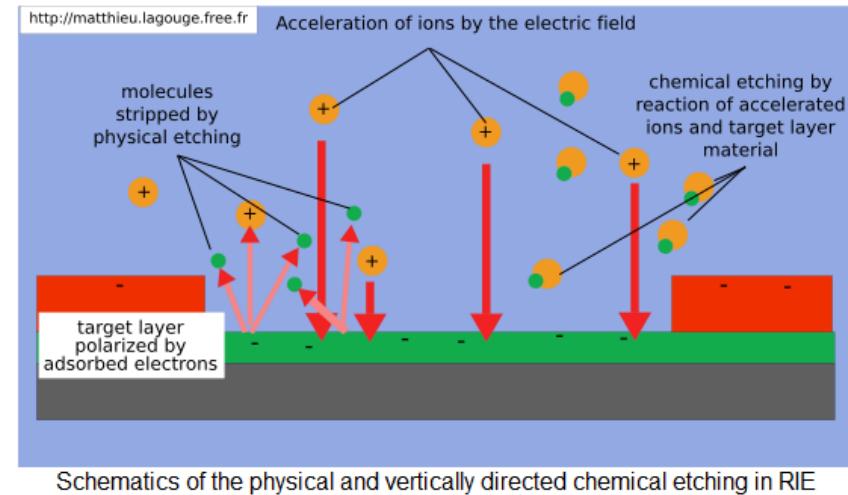
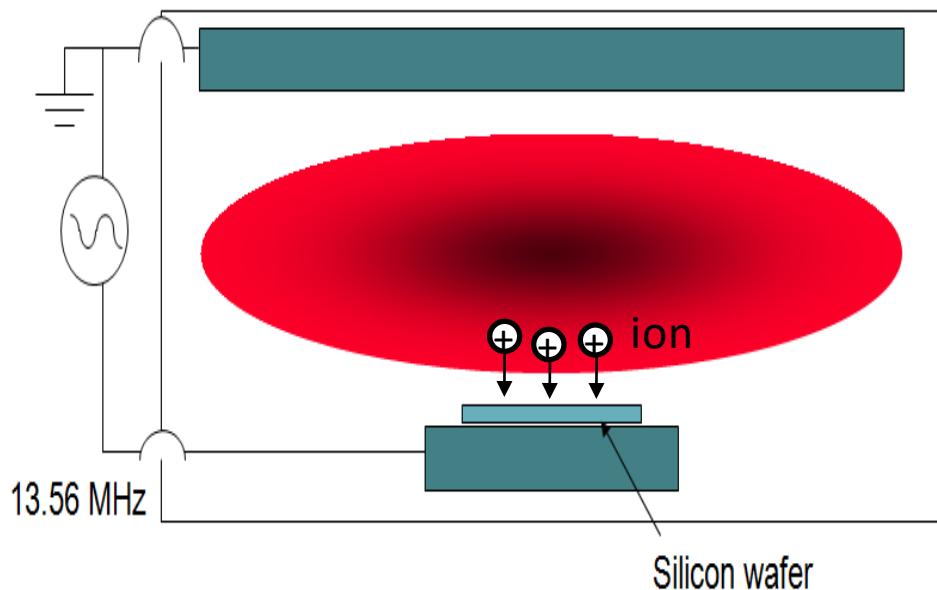


- O sinal RF é usado para gerar um campo elétrico variável no tempo entre o plasma e o eletrodo;
- Este campo elétrico transfere energia para os elétrons, oscilando-os;
- Com a energia adquirida os elétrons ionizam o gás..

# Descargas em rádio-frequência

## Autopolarização do substrato

Reactive Ion Etcher (RIE)

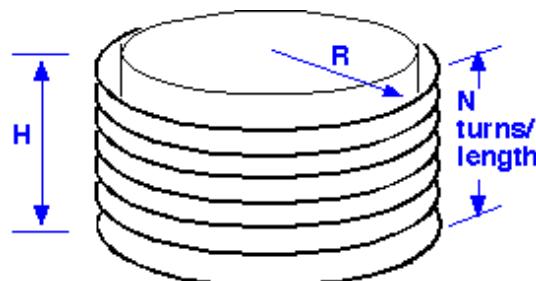


# Descargas em rádio-frequência

## Acoplamento indutivo (ICP)

### Princípio da descarga

I.



Uma tensão RF é aplicada a uma bobina enrolada em torno de um dielétrico. Isto gera um campo magnético dado por:

$$B_z = \frac{NI}{\mu_0} e^{j\omega t}$$

$\mu_0$  vacuum permeability

II.

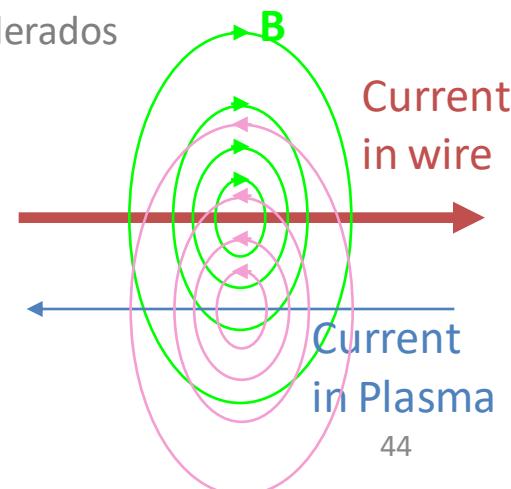
Este campo magnético variável no tempo cria um campo elétrico variável no tempo (perpendicular ao campo magnético).

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$E_\theta = - \frac{j\omega r}{2} (B_{z0}) e^{j\omega t}$$

III.

O campo elétrico induz uma corrente no plasma. Os elétrons assim acelerados sustentam a descarga.

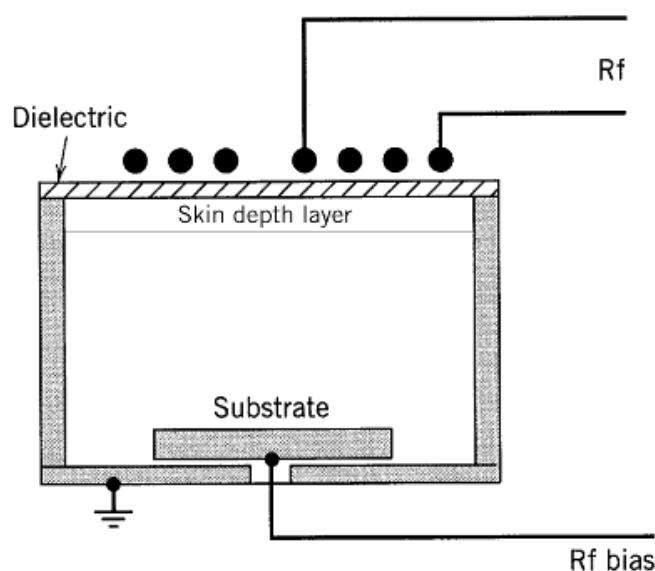


# Descargas em rádio-frequênciā

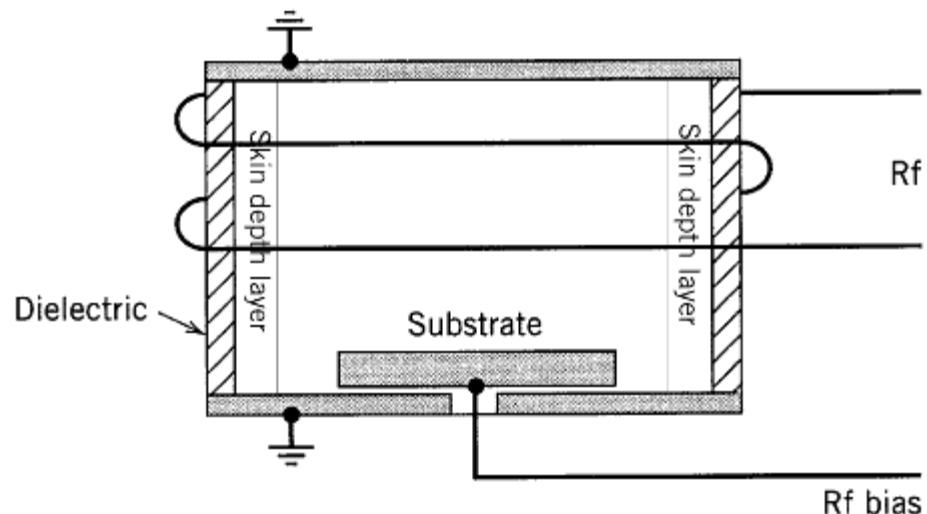
## Acoplamento indutivo( ICP)

Exemplos de configuração da bobina

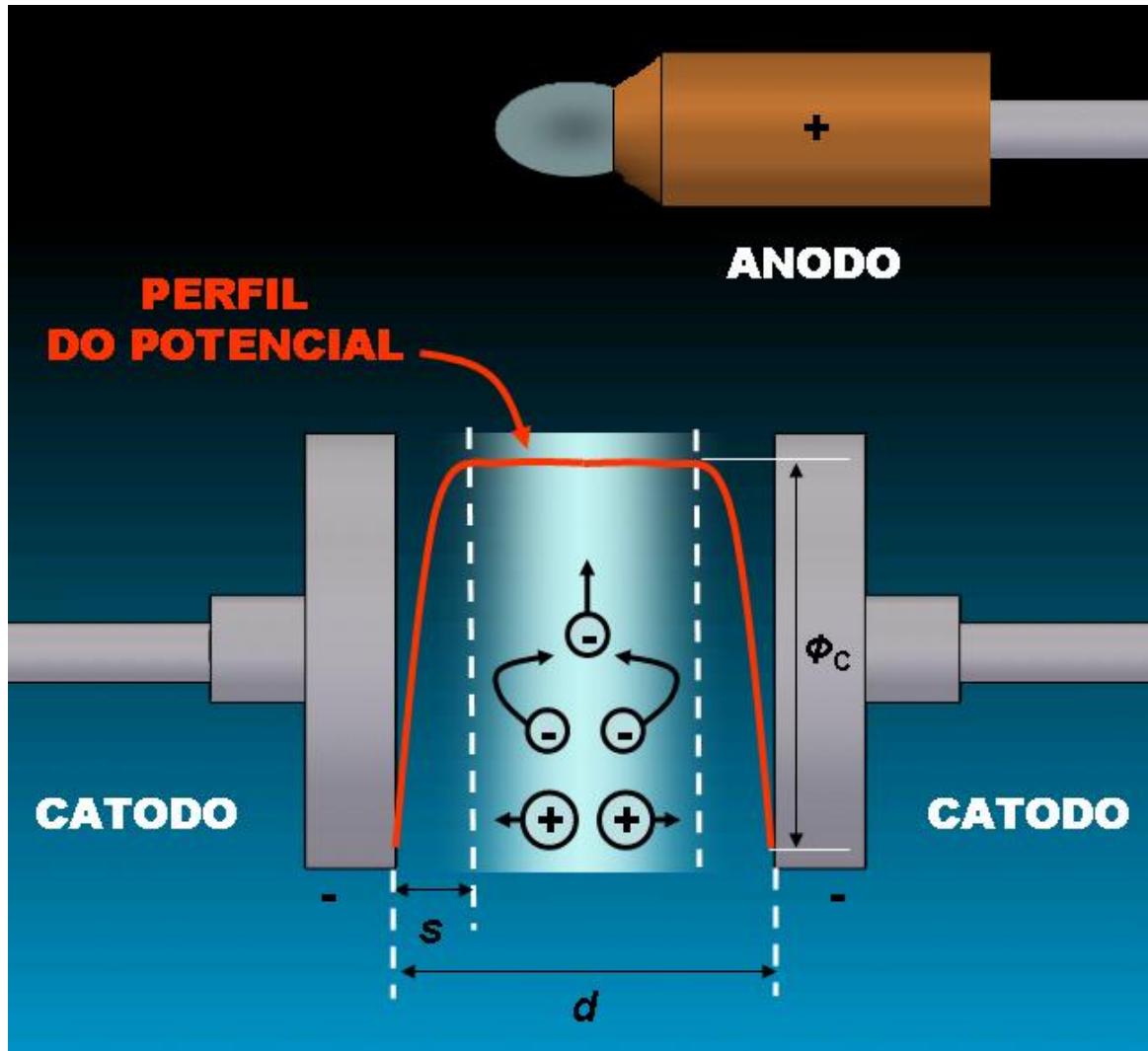
Bobina planar



Bobina cilíndrica

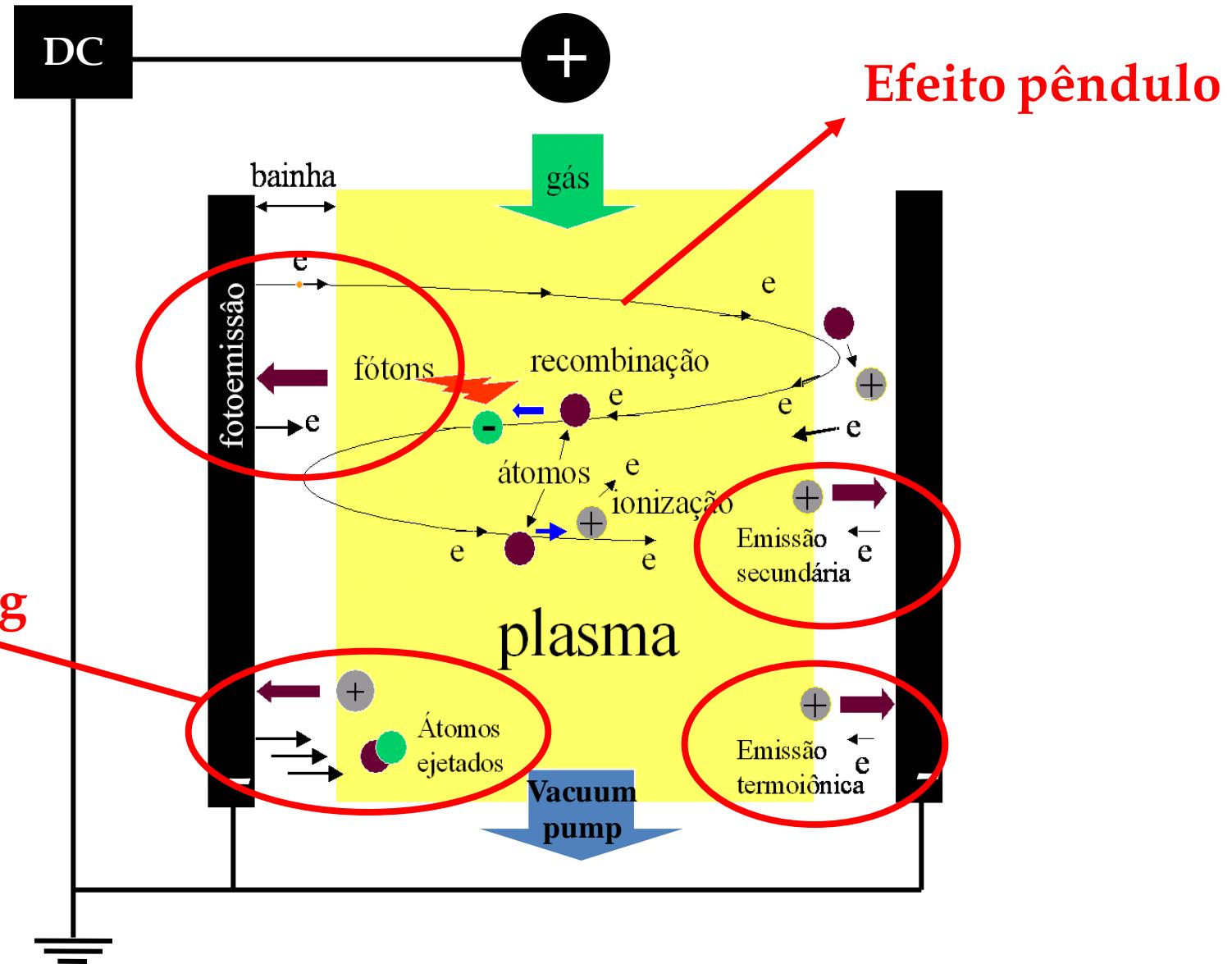


# Descarga de cátodo oco

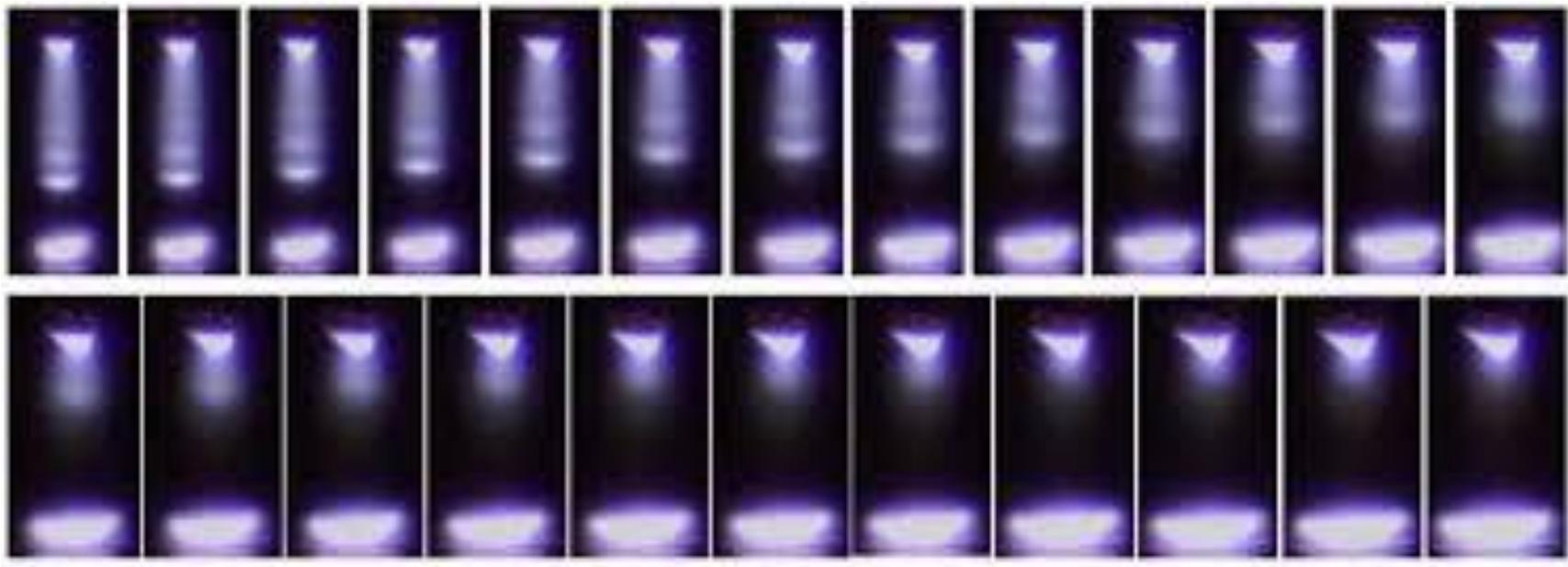


- Os elétrons ficam confinados entre as superfícies polarizadas negativamente.
- Tal efeito gera plasmas mais densos.
- Embora possa ser criado propositalmente, o efeito de cátodo oco pode ser um problema no tratamento de peças que contenham furos. Nestes casos, pode haver sobreaquecimento.

# Descarga de cátodo oco

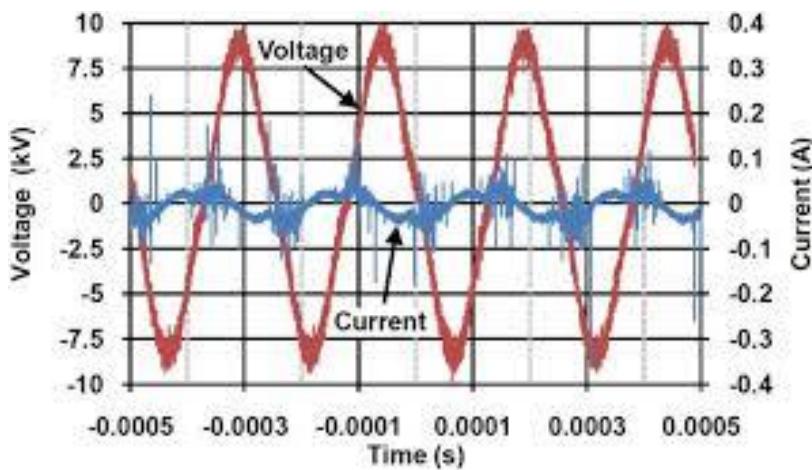
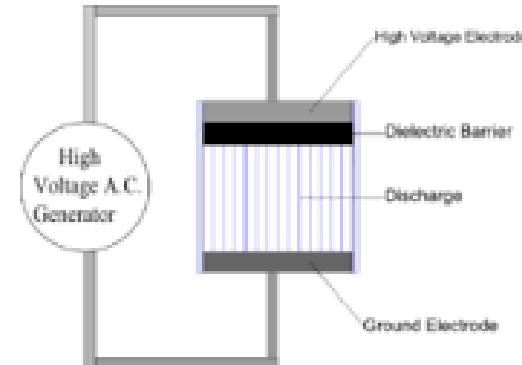


# APGD (Atmospheric pressure glow discharge)



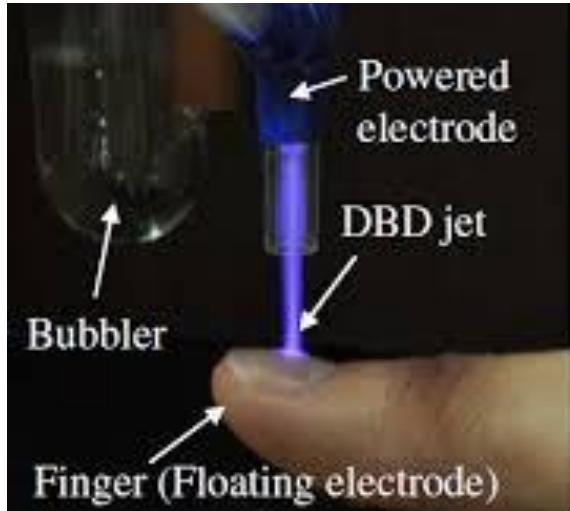
- Em pressão atmosférica a tendência é que a descarga luminescente se transforme em um arco.
- Portanto, é preciso criar estratégias para limitar a corrente da descarga.
- Dentre elas, estão a refrigeração dos eletrodos e/ou o uso de geometrias mais complexas.

# Descarga de barreira dielétrica (DBD)

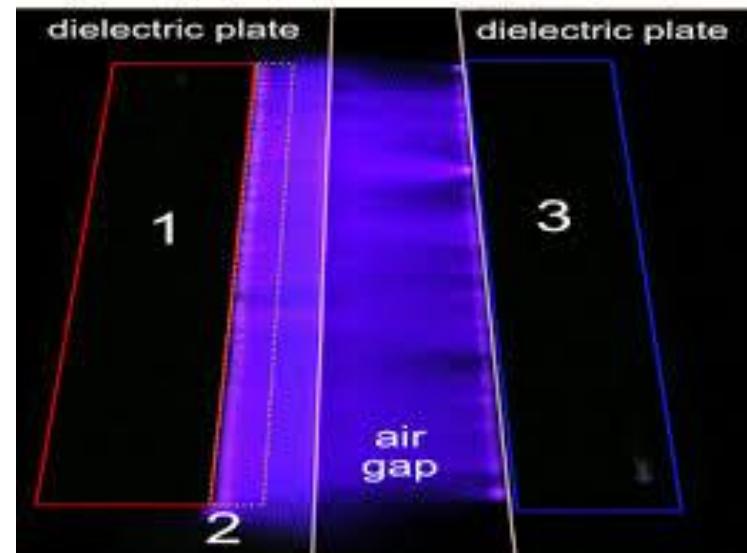


- Na DBD o menos um dos eletrodos é coberto com um dielétrico. O que limita a corrente da descarga, uma vez que não há corrente de condução, apenas de deslocamento.
- Estas descargas podem operar em pressão atmosférica e serem usadas para gerar jatos de plasma.

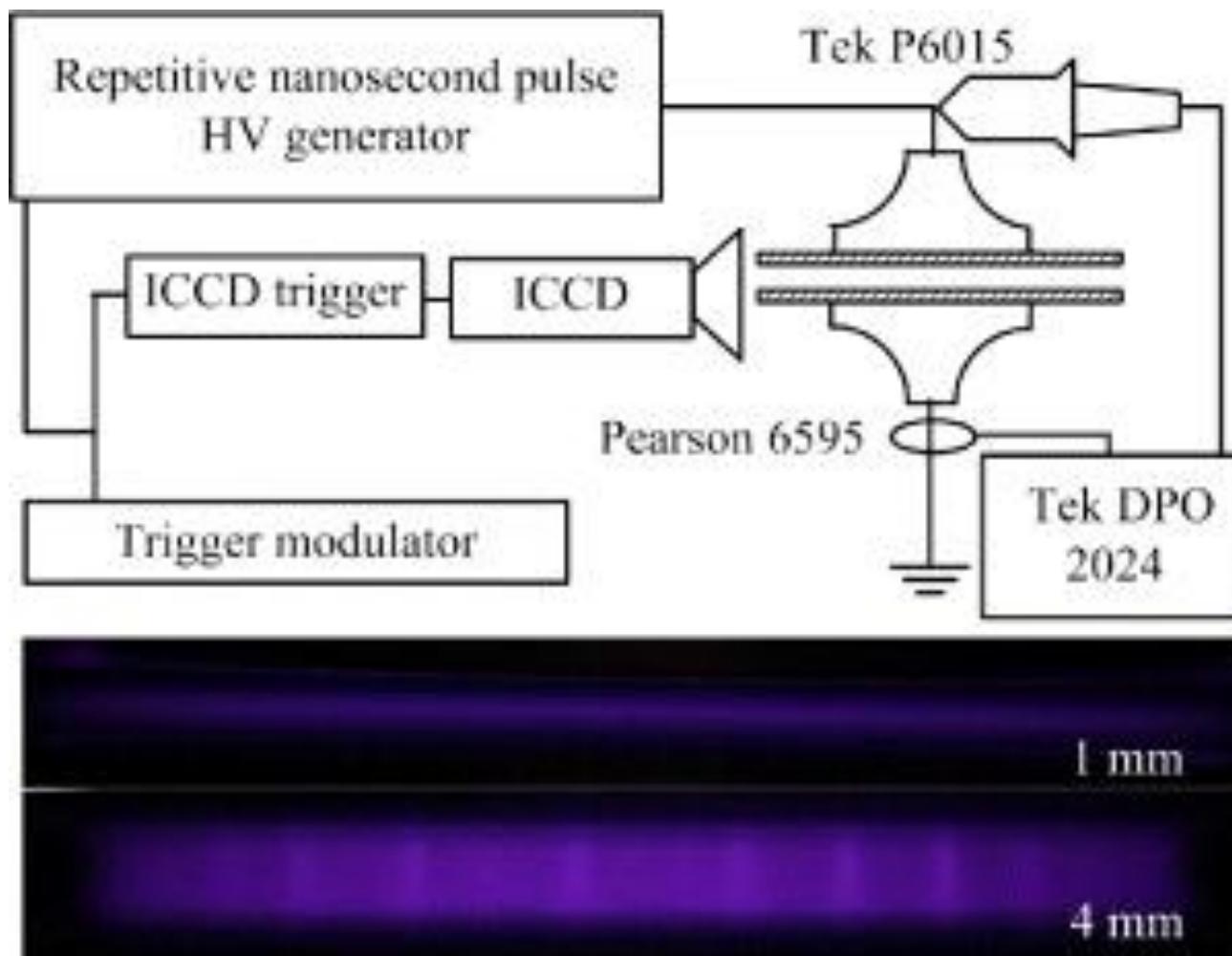
# Descarga de barreira dielétrica (DBD)



- As descargas podem ser “contínuas” se assemelhando visualmente a uma descarga luminescente ou filamentares (modo mais comum).
- A potência é tipicamente baixa.



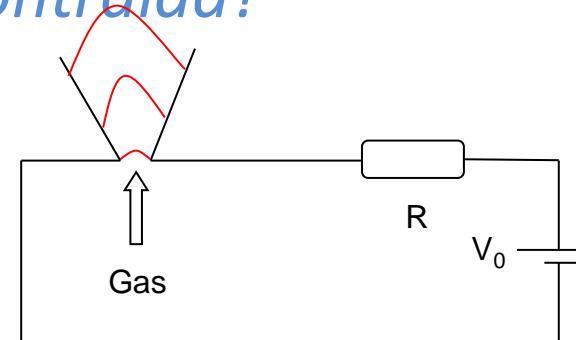
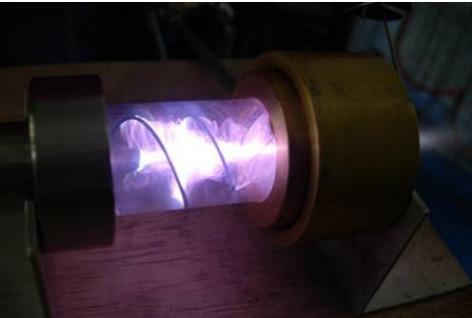
# Nanosecond pulsed discharge



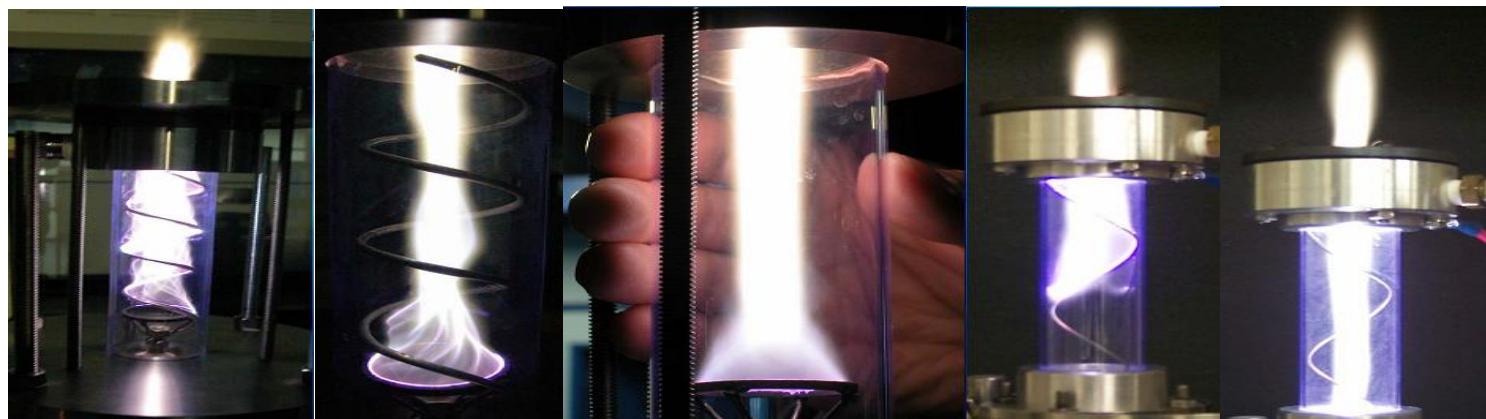
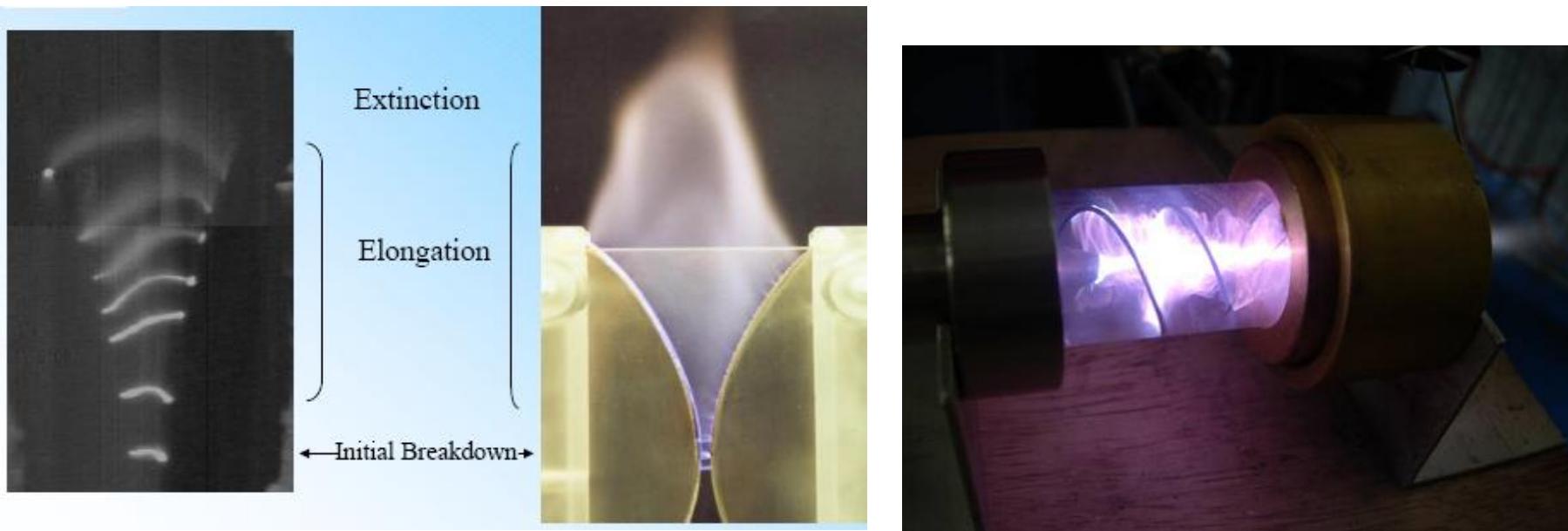
# Descargas de “arco” deslizante

## Descarga não-estacionária

- *Eletrodos divergentes*
- *A ruptura ocorre na menor distância entre eletrodos*
- *A coluna de plasma é empurrada pelo gás*
- *A descarga é extinta e reiniciada*
- *Pode gerar plasmas térmicos, não-térmicos ou no regime transicional*
- *Arco ou descarga luminescente contraída?*



# Descargas de “arco” deslizante



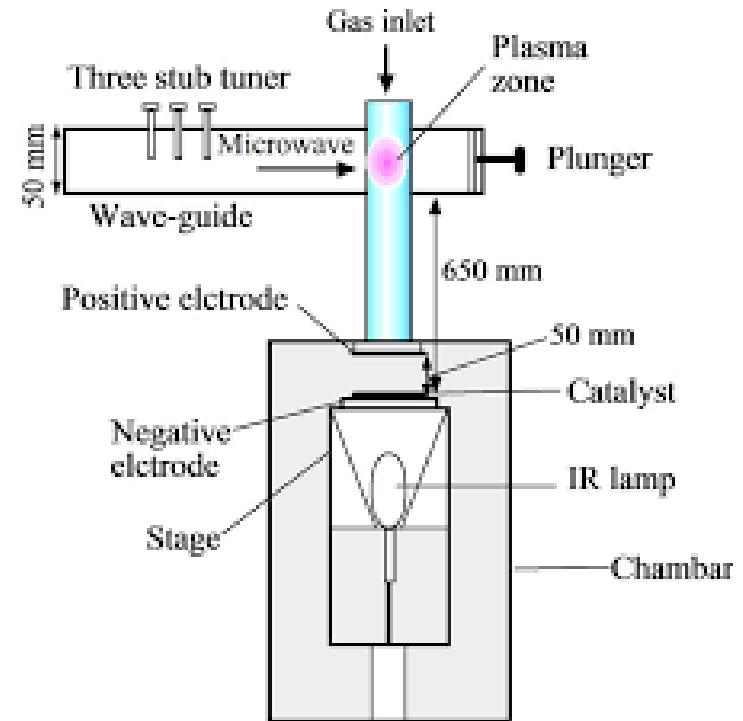
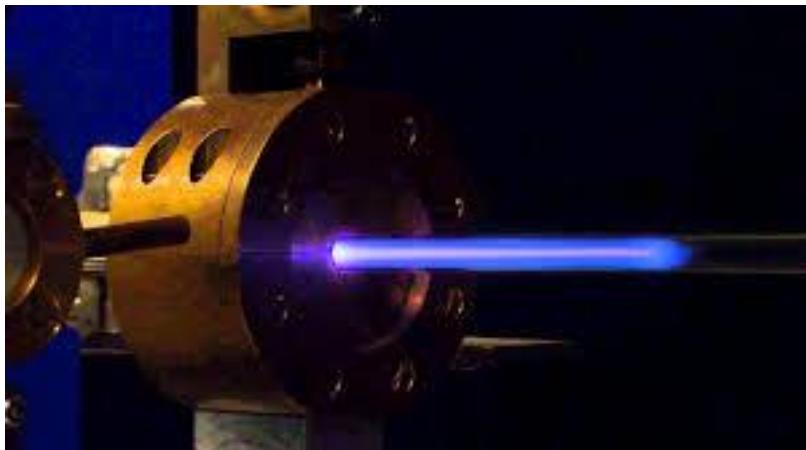
# Corona



- Ocorrem em pressão atmosférica.
- São descargas de baixa luminosidade.
- Problemas em linhas de transmissão de alta tensão.



# Micro-ondas

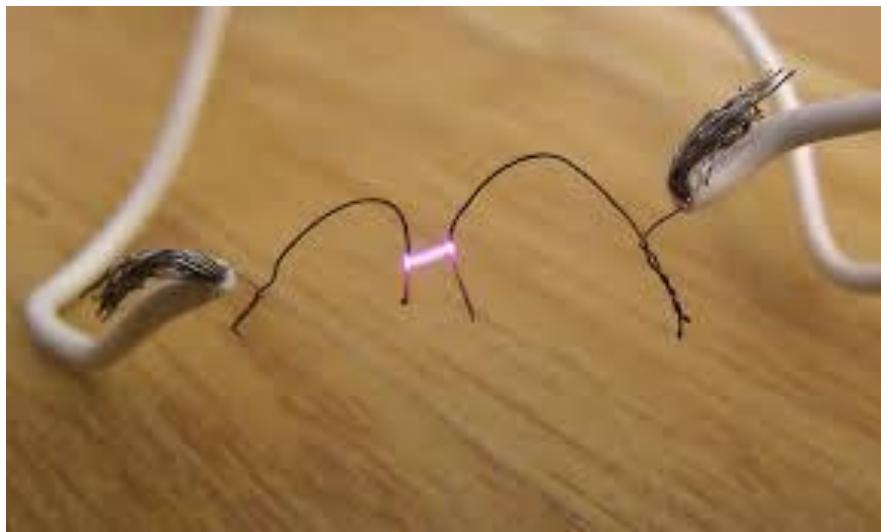


- Sem eletrodos.
- Frequências da ordem de GHz (mesma ordem da frequência de plasma).
- Geram plasmas de alta densidade.

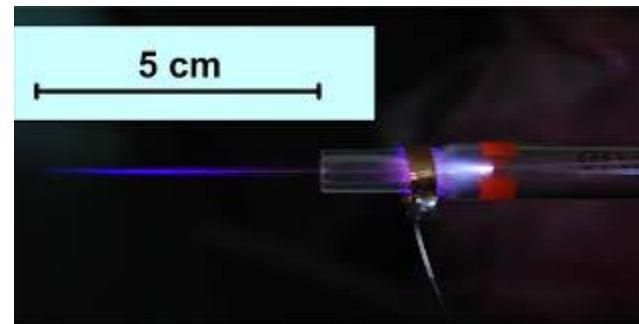
# Descarga “spark”



- Entre a corona e o arco.
- Usada para ignição de motores de combustão interna.

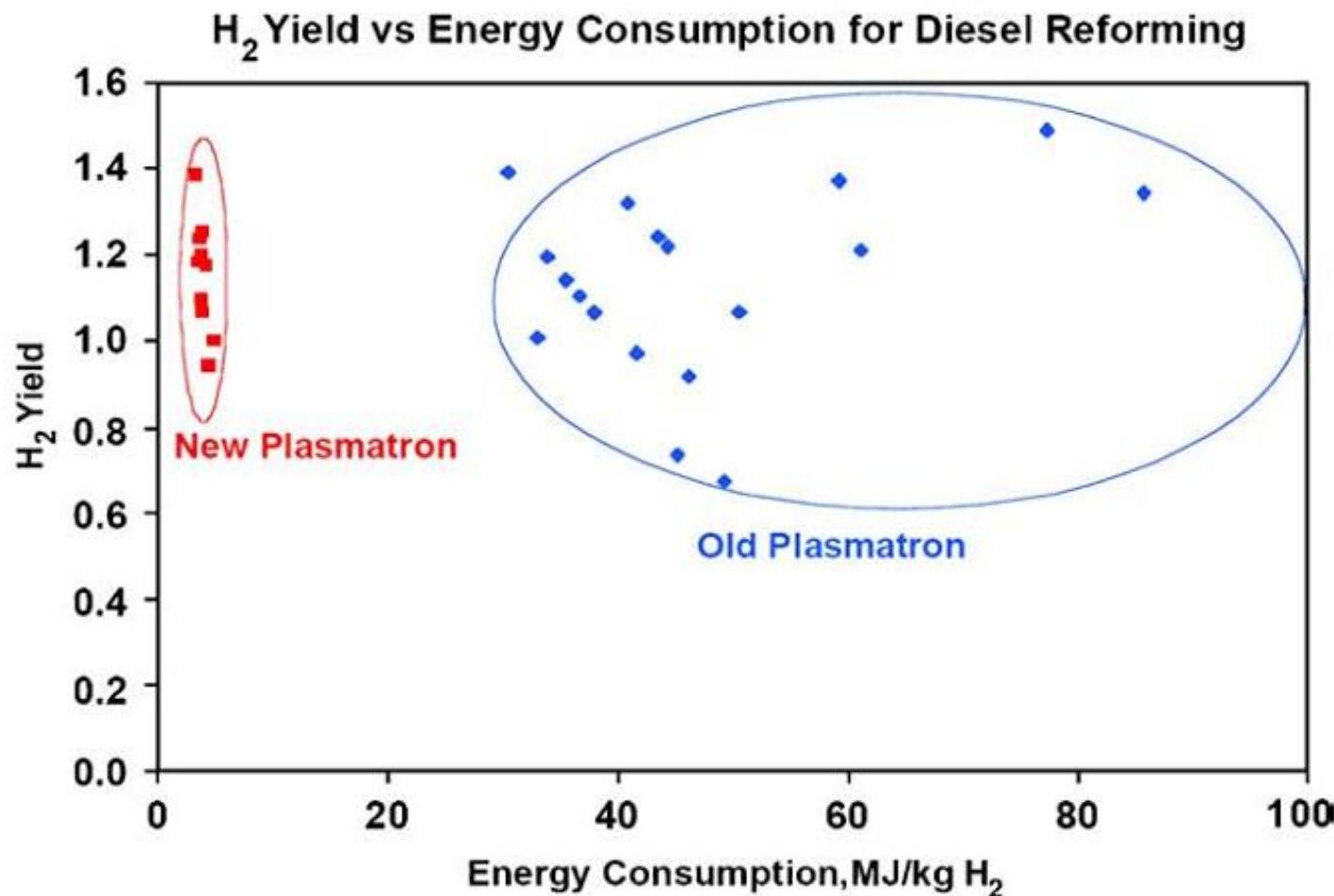


# Jatos de plasma



- Podem ser gerados por DBD, arco deslizante, arco, micro-ondas, RF, etc....

# Química de plasmas: com ou sem equilíbrio?



# O que a tecnologia de plasmas pode oferecer à Química?

- Com

E se for uma reação  
envolvendo elétrons?

# O que a tecnologia de plasmas pode oferecer para a Química?

- Em um plasma fora do equilíbrio termodinâmico  $T_e \gg T$ , logo  $v_e \gg v$

$$\langle K \rangle = \int_0^{\infty} v_e \sigma(v_e) F_e(v_e) dv_e$$

Só depende da velocidade (energia) dos elétrons

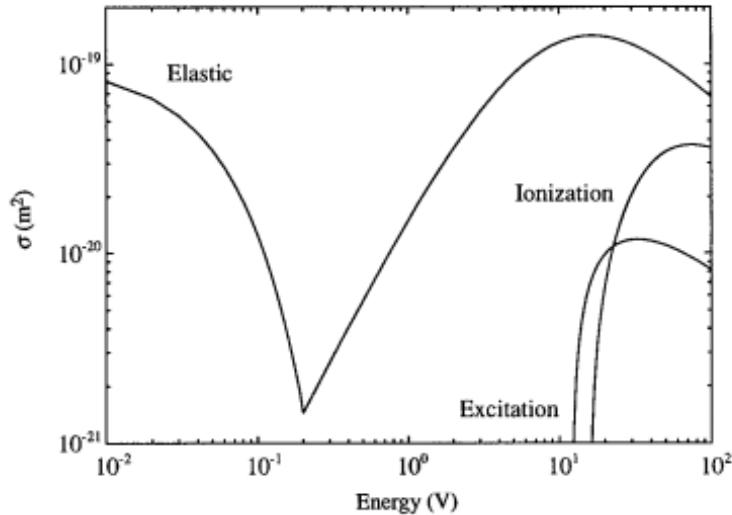
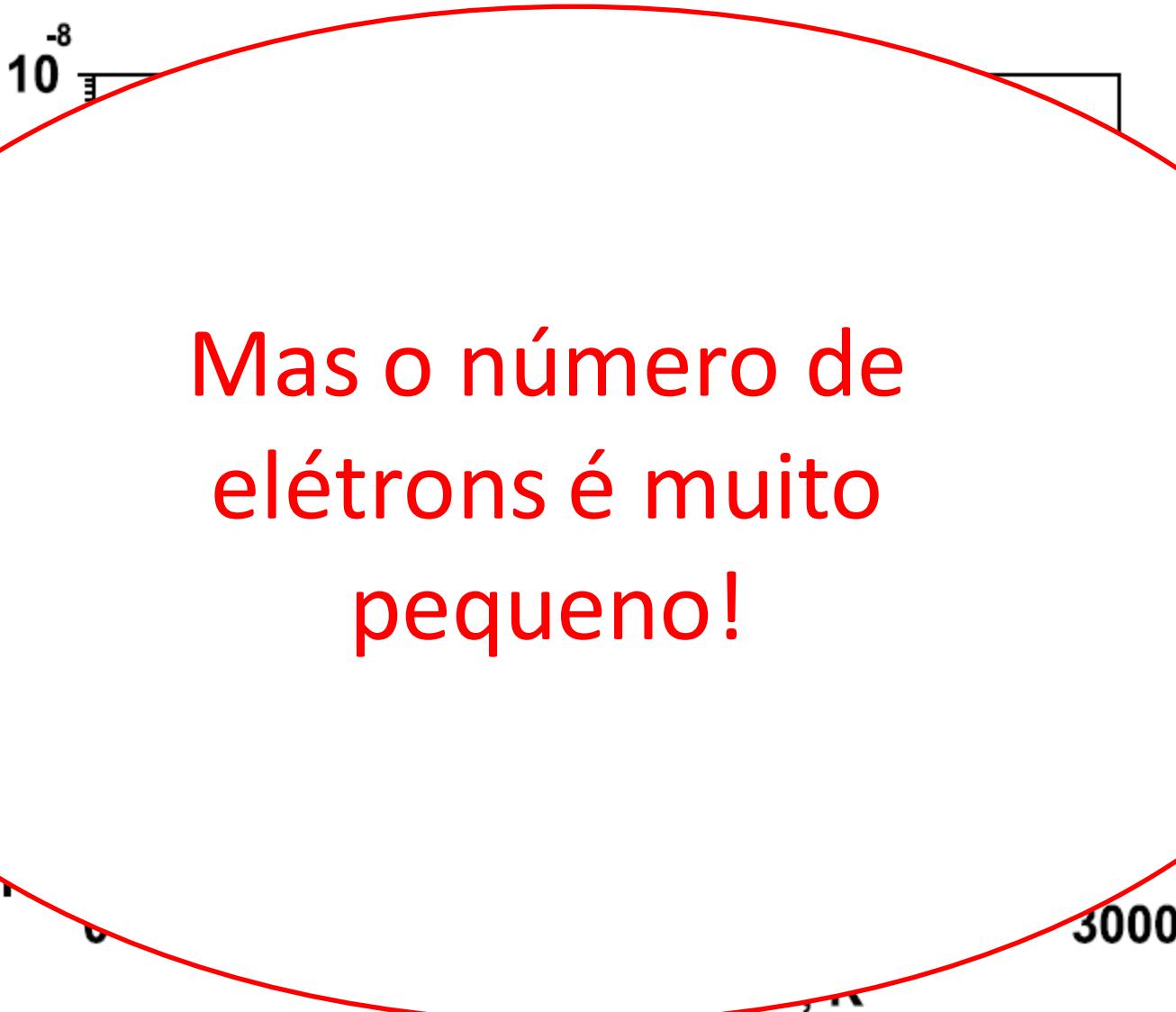


FIGURE 3.13. Ionization, excitation and elastic scattering cross sections for electrons in argon gas (compiled by Vahedi, 1993).

# Constante de reação

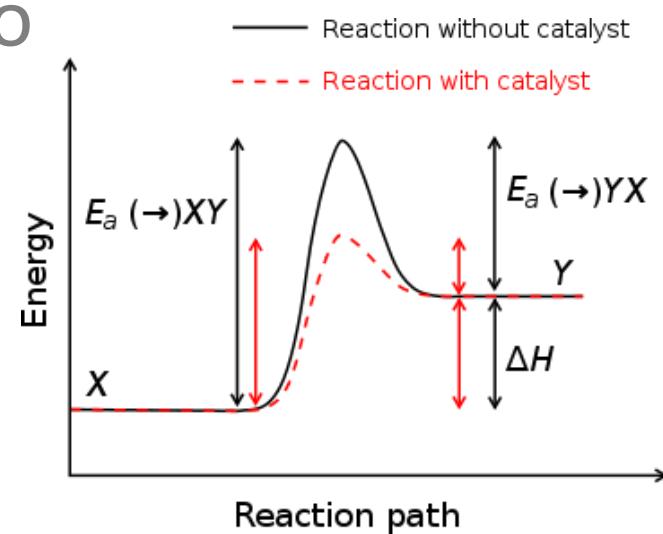


# O que a tecnologia de plasmas pode oferecer para a Química?

- Redução da energia de ativação

$$k_R(E_v, T) = k_{R0}(E_v, T) \exp\left(-\frac{E_a - \alpha E_v}{T}\right)$$

Energia vibracional Temperatura translacional



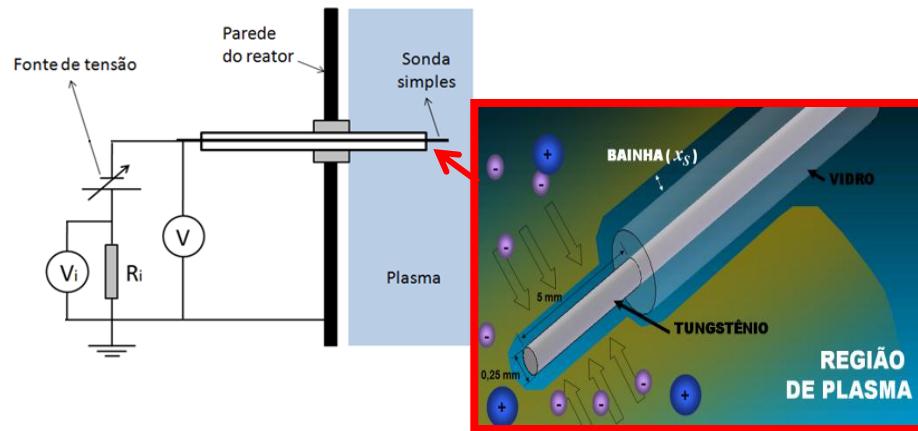
$$\alpha \approx \frac{E_{ad}}{E_{ad} + E_{ar}}$$

Modelo de Fridman-  
Macheret

- Geração de radicais e espécies excitadas

# Diagnóstico de plasmas

## - Sonda de Langmuir



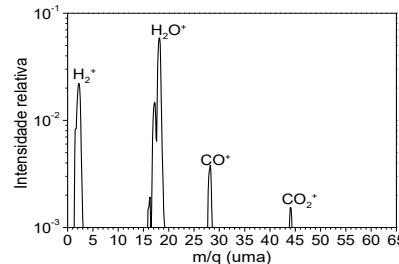
- potencial flutuante ( $V_f$ );
- potencial de plasma ( $V_p$ );
- temperatura eletrônica ( $T_e$ );
- densidade de elétrons e de íons ( $n_e, n_i$ );
- comprimento de Debye ( $\lambda_{De}$ );
- função distribuição de energia dos elétrons (FDEE).

## - Espectroscopia óptica de emissão



- intensidade da emissão de espécies neutras e iônicas do gás;
- estimativa da densidade de espécies neutras como F e O atômico (actinometria).

## - Espectrometria de massa

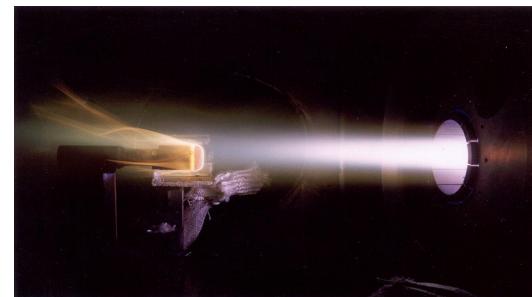
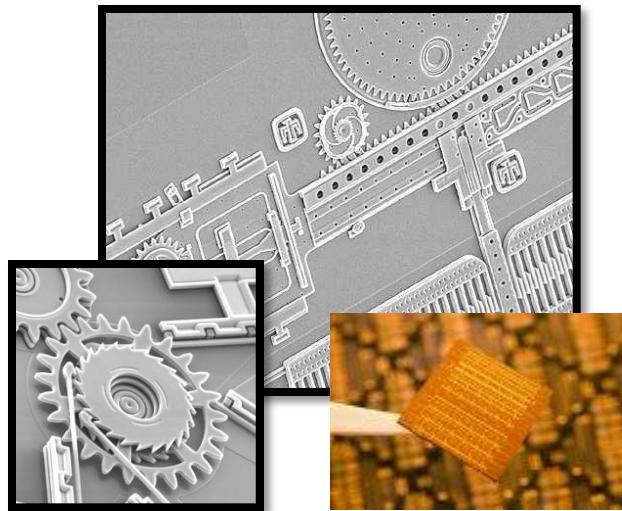
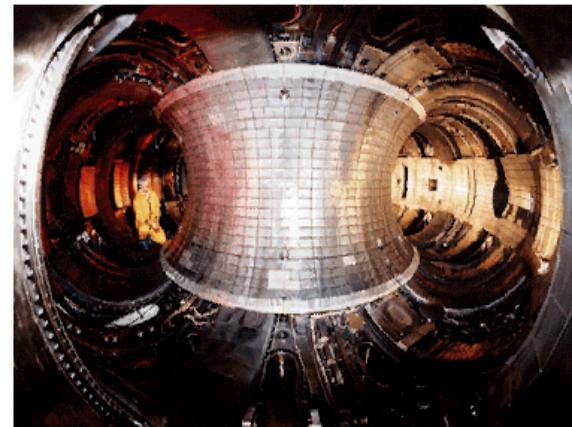
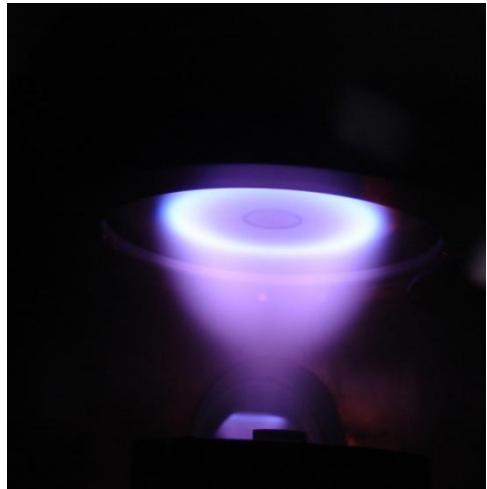


- pressão parcial das espécies neutras do gás (íons + e - também é possível).

# Simulações

- Modelos de fluidos
  - *Usa as equações da magnetohidrodinâmica (MHD)*
- Modelos cinéticos
  - *Simula o comportamento das partículas sob a ação de campos*
  - *Usa métodos estatísticos (PIC/Monte Carlo)*
- Modelos híbridos

# Aplicações

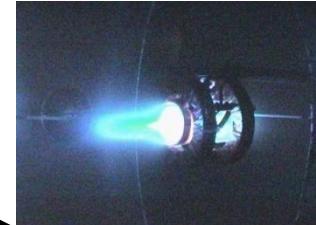


# Aplicações

- Displays a plasma;
- Lasers;
- Lâmpadas fluorescentes;
- Fontes de feixe de elétrons e íons.



- Propulsores a plasma.



**Fontes de luz e radiação**

**Energia Mecânica**

**Eletricidade**

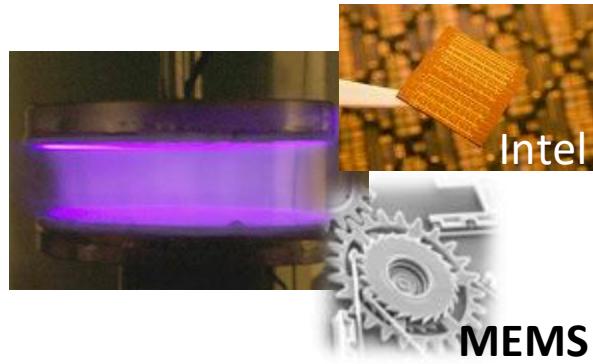
- Comutadores de energia elétrica;
- Geração de energia.

**Aplicação dos “Plasmas frios”**

**Química**

**Calor**

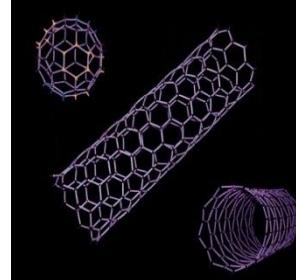
pressão > 1 Torr



**MEMS**

- Processamento de materiais por plasmas
- Microeletrônica: corrosão, deposição, oxidação, implantação, passivação;
  - Deposição e pinturas para área automotiva e aeroespacial;
  - Fusão de materiais, soldagem, corte, têmpera;
  - Síntese de cerâmicas, pós ultrapuros, nano-pós, nano-tubos;
  - Tratamentos de adesão (ex.: produtos têxteis);
  - Tratamento de materiais para bio-compatibilidade, esterilização e limpeza.

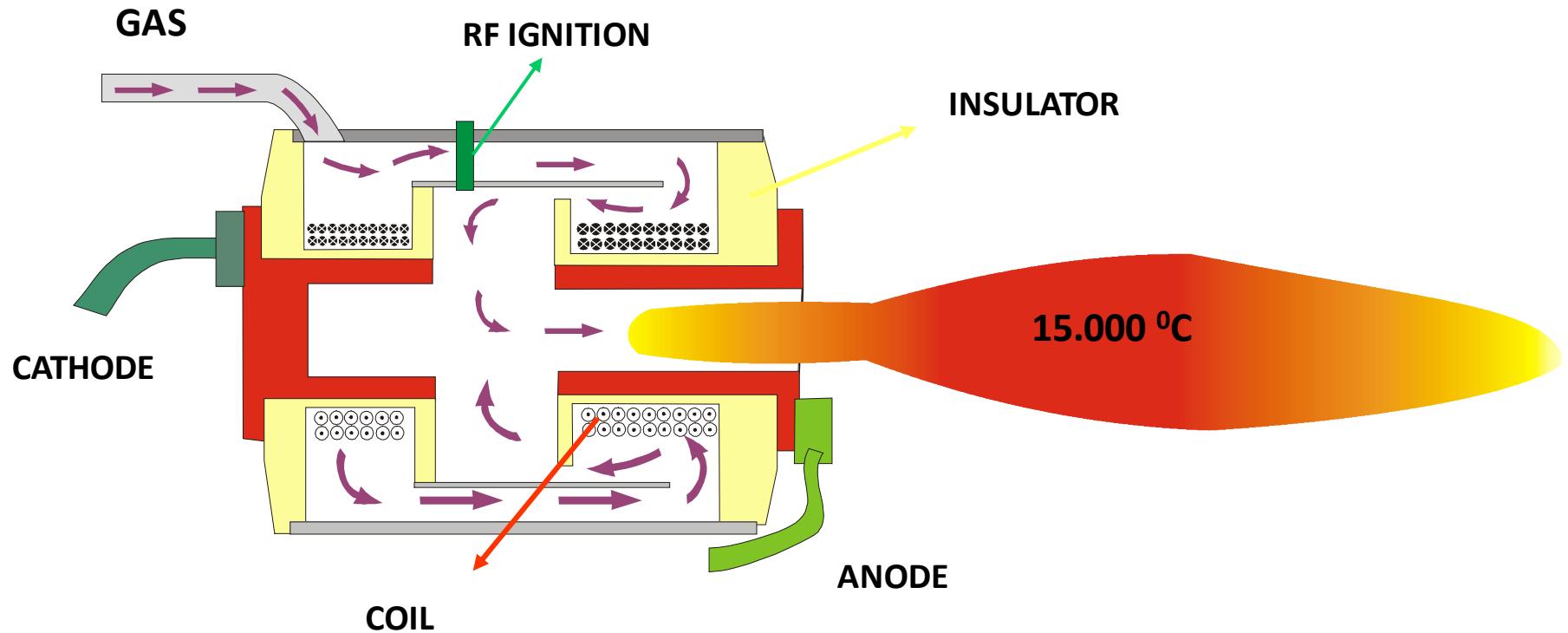
**Nanotubos**



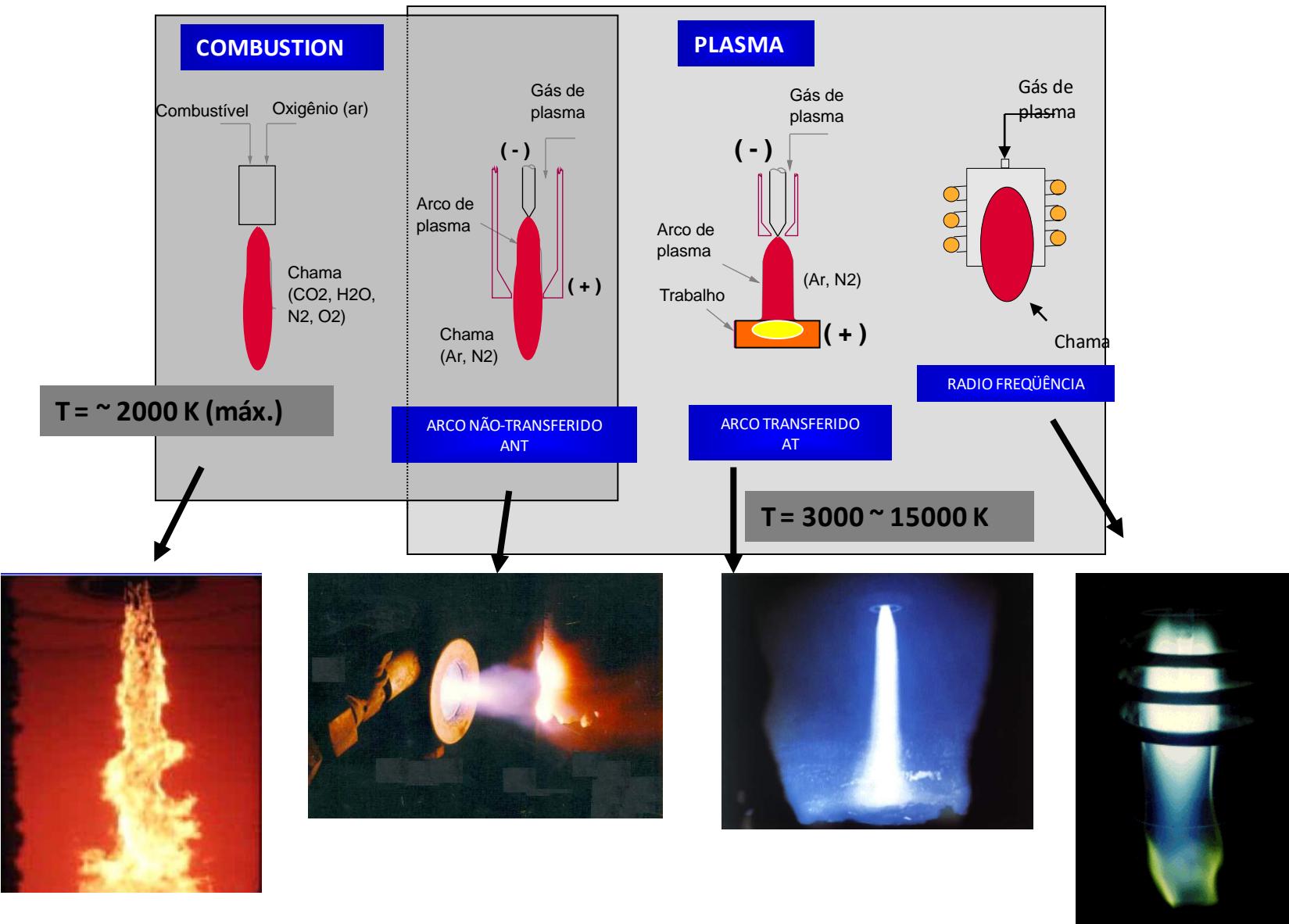
# PLASMAS TÉRMICOS

# Plasmas térmicos: tochas de plasma

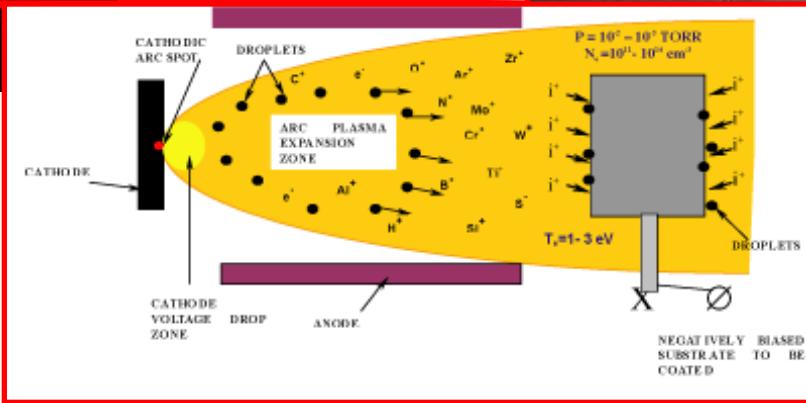
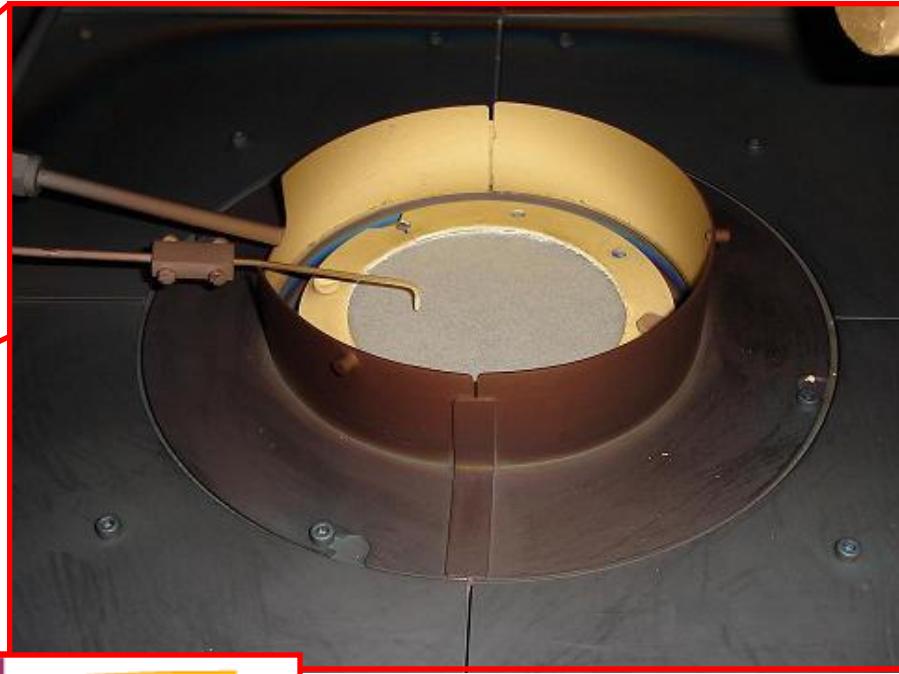
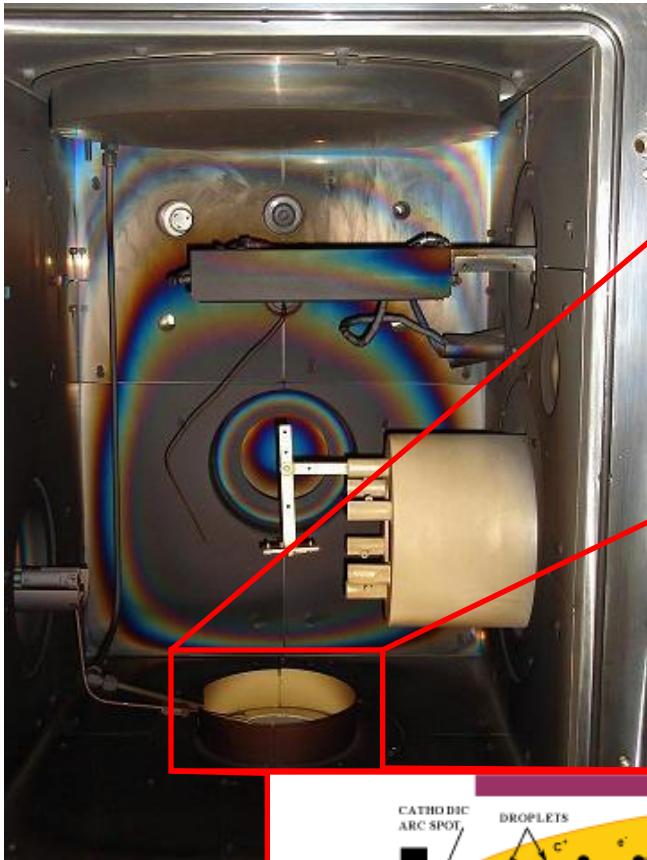
- Plasmas em equilíbrio termodinâmico local



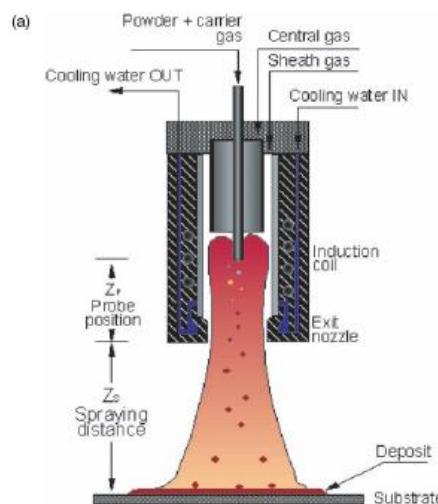
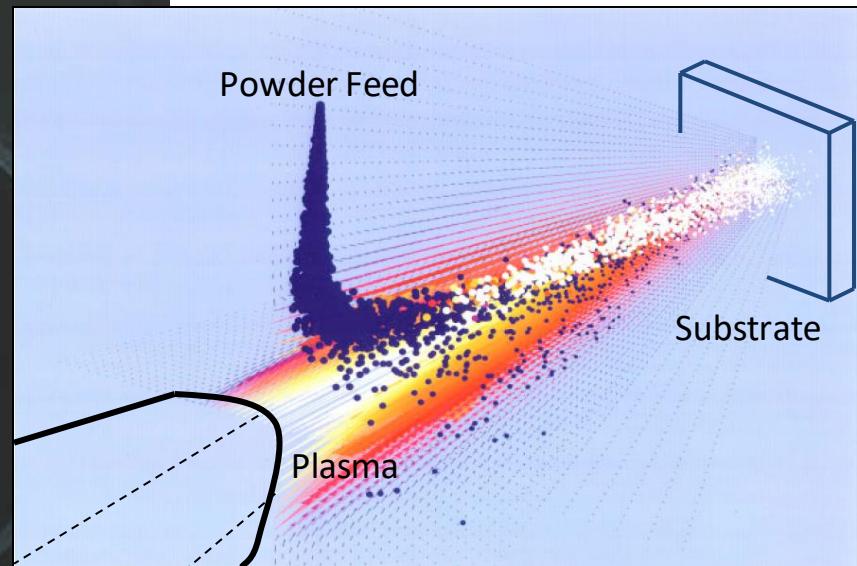
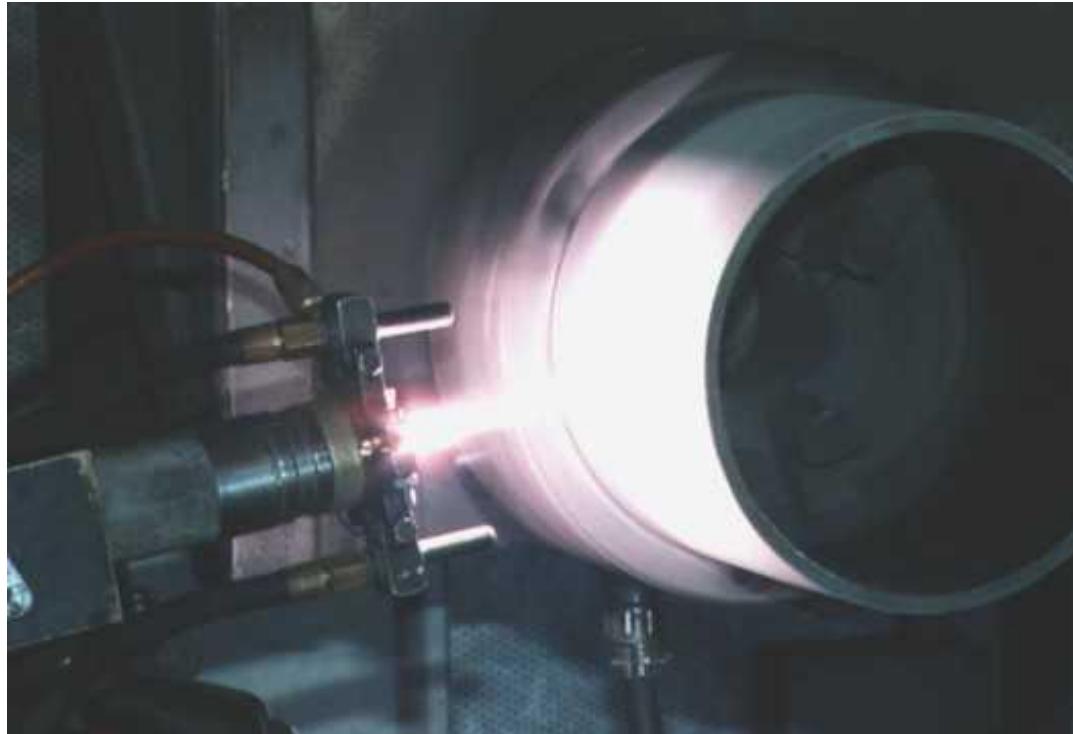
# Tochas de plasma



# Deposição por arco em vácuo



# Thermal Plasma Spray



1. O pó é fundido no plasma
2. Gotas derretidas são jogadas contra a superfície
3. As gotas solidificam no substrato
4. Uma camada é formada

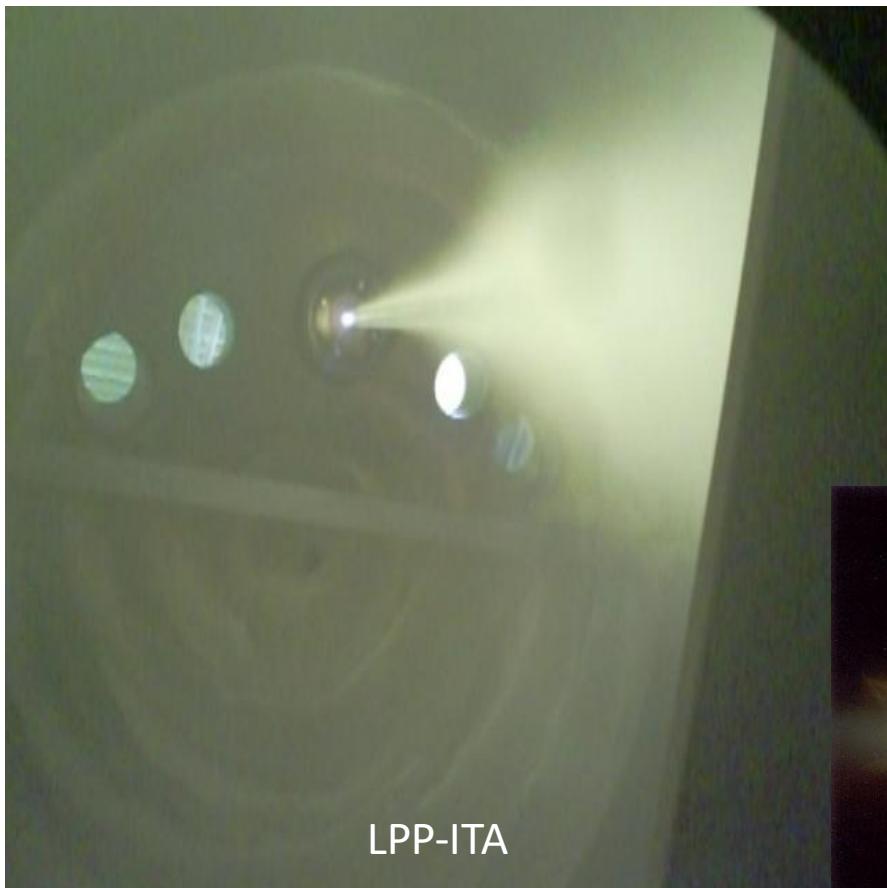
# Gasificação assistida por plasma

## Plasma Conversion

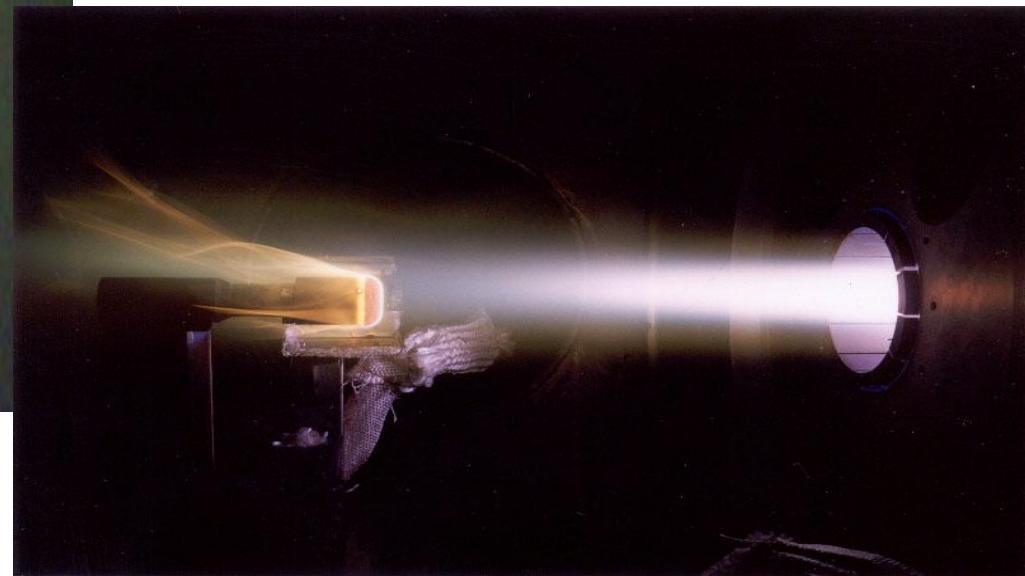
- Hitachi Metals Ltd.
- Pilot to full scale development
- Yoshii, Japan
  
- Commissioned 1999
- Pilot 24 tons/day
- Full scale 2002
- 170 tpd MSW & ASR
- 1.8 MW / 8 MW



# Simulação de reentrada com tochas de plasma

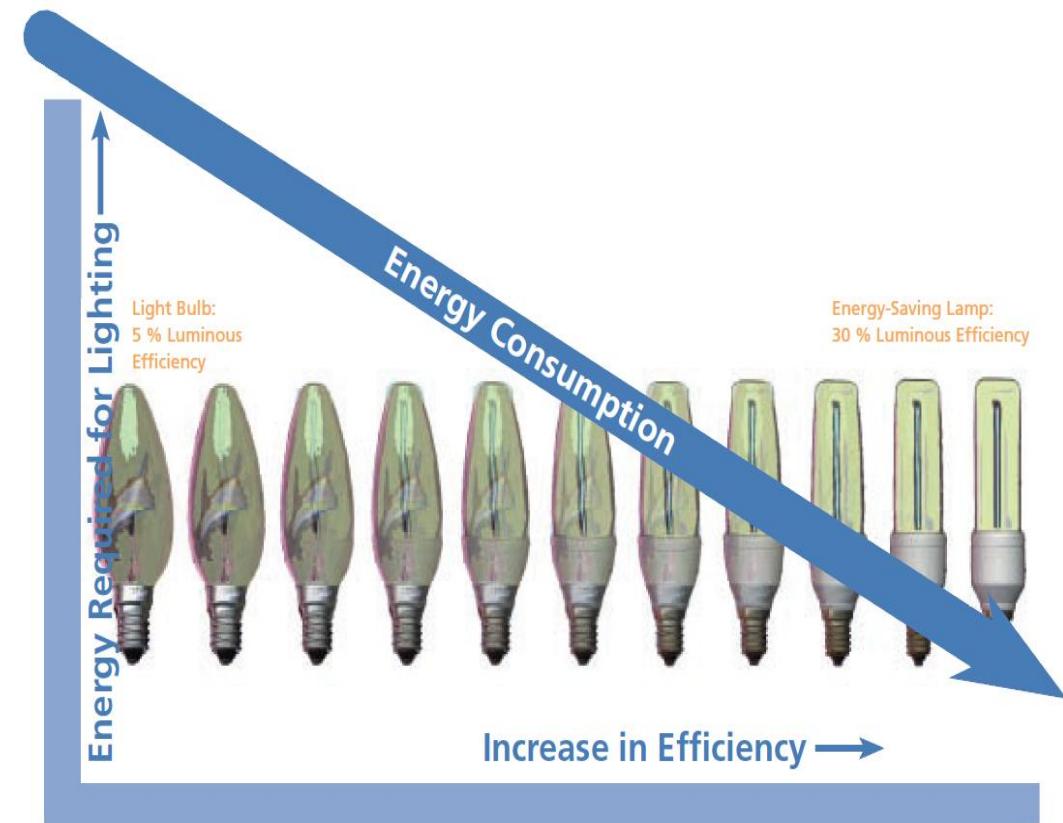


LPP-ITA

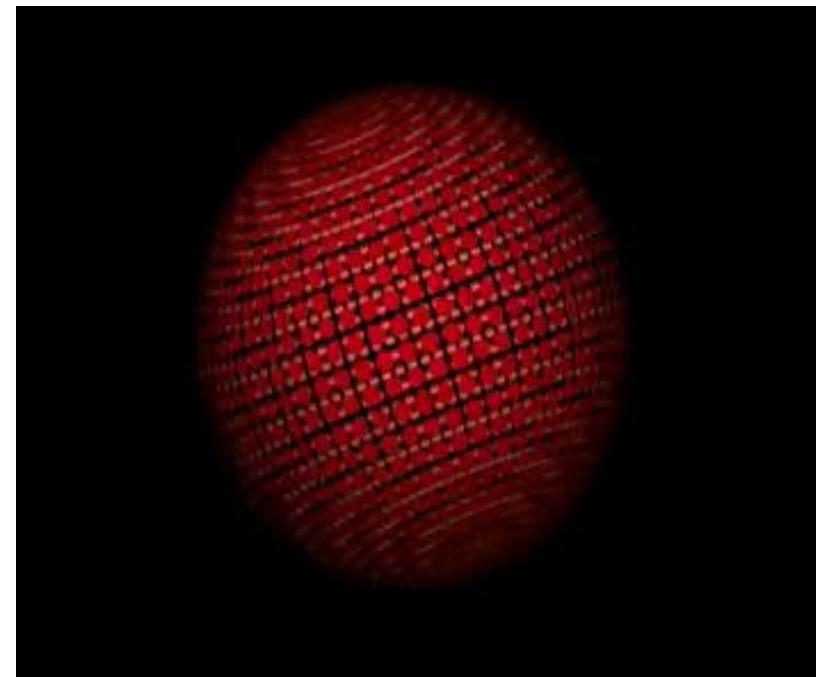


# PLASMAS NÃO- TÉRMICOS

# Illuminação



Lâmpadas de plasma recém-desenvolvidas são 10 vezes mais claras que as comuns, consomem quase metade de energia e duram até 20.000 horas.



# Aplicações de plasmas não-térmicos

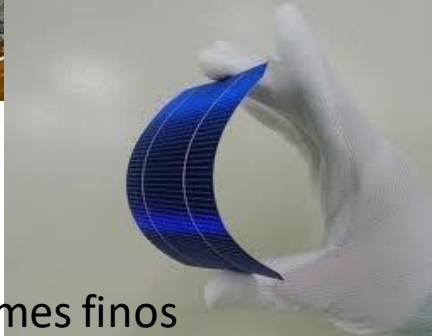
## Recobrimentos ou Filmes finos

Definição: Filme fino é uma fina camada de material que varia de frações de um nanômetro (nm, monocamada atômica) para vários micrômetros ( $\mu\text{m}$ ) de espessura.

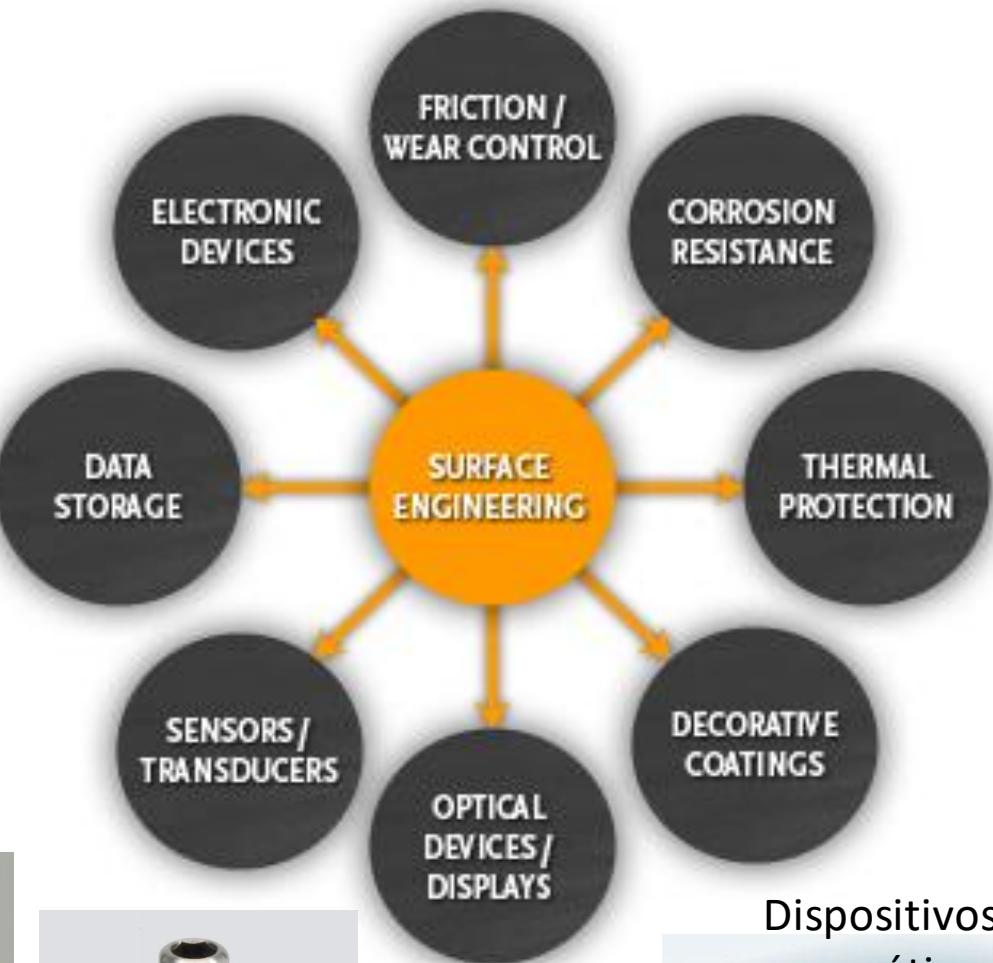
### Aplicações:



Displays flexíveis  
(OLED)



Painéis solares de filmes finos



Controle de  
desgaste

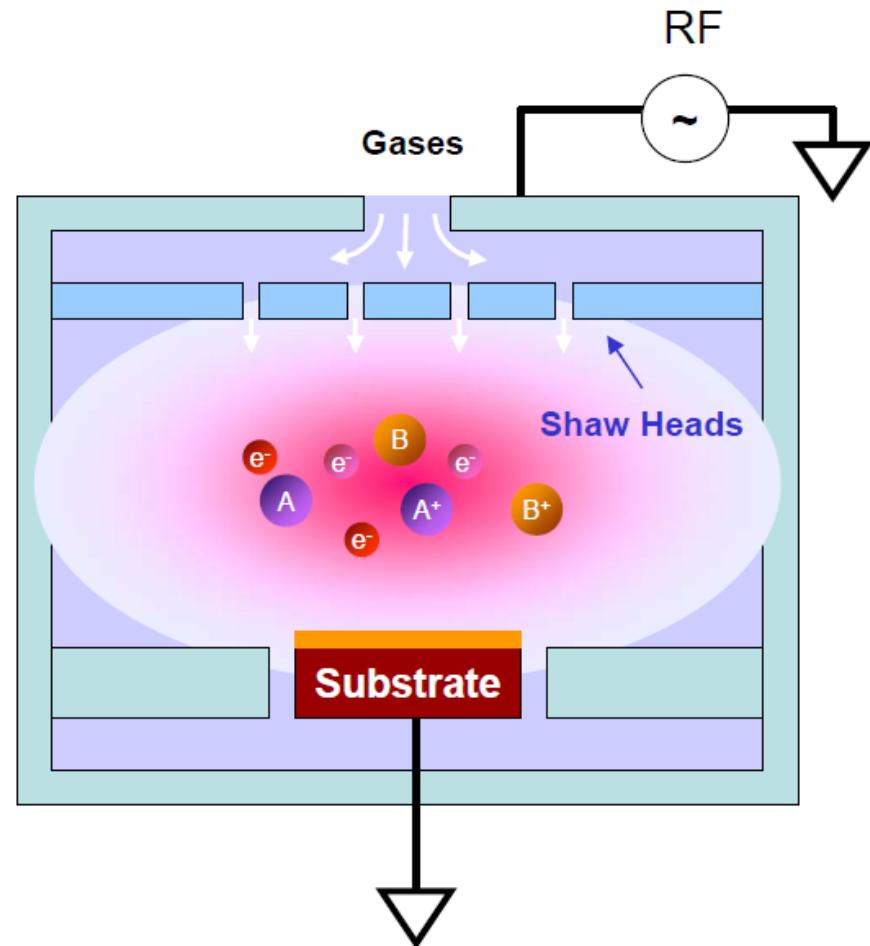


Dispositivos  
óticos

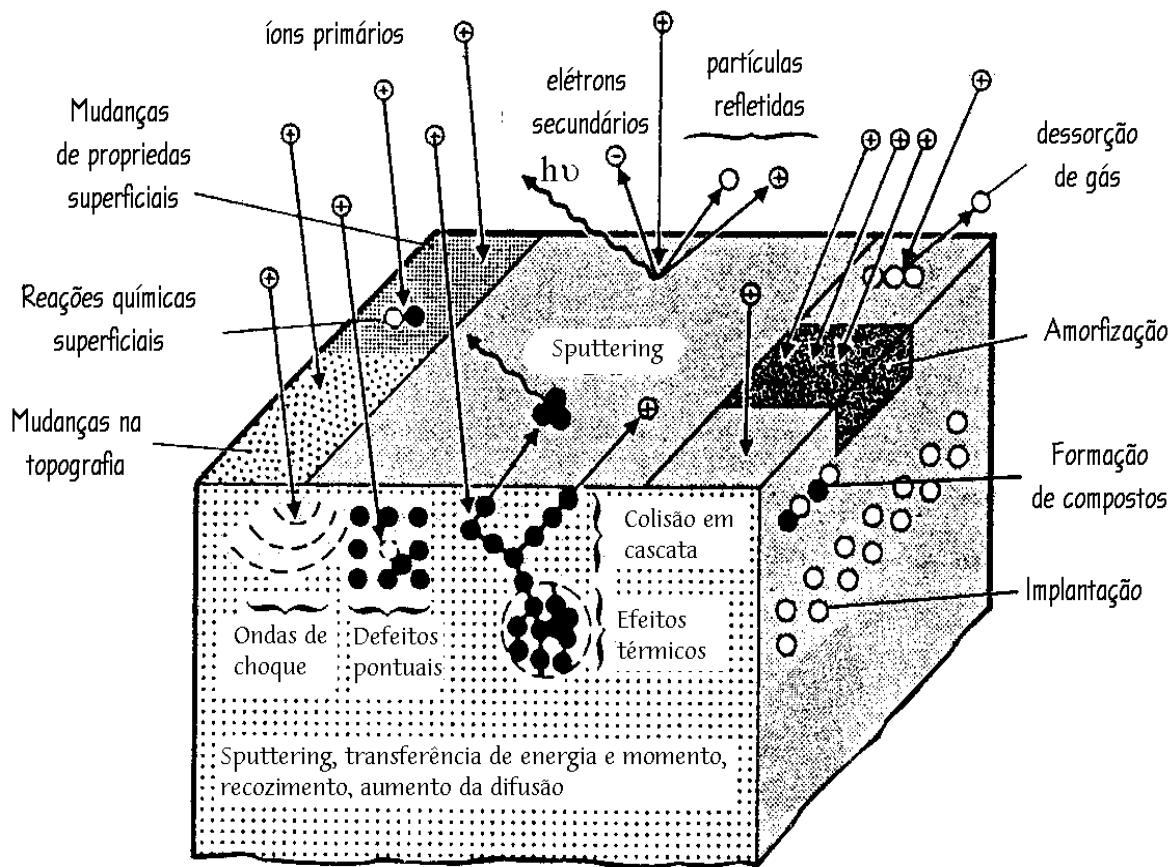
# Deposição de filmes

## Plasma-Enhanced CVD (PECVD)

- Filme formado por reações químicas no volume da descarga e na superfície do substrato.
- Permite obter materiais em temperaturas menores que as usadas em processos convencionais.
- Dependente do fluxo de gases.
- Uniformidade.
- Recomendado para deposição em geometria complexas.

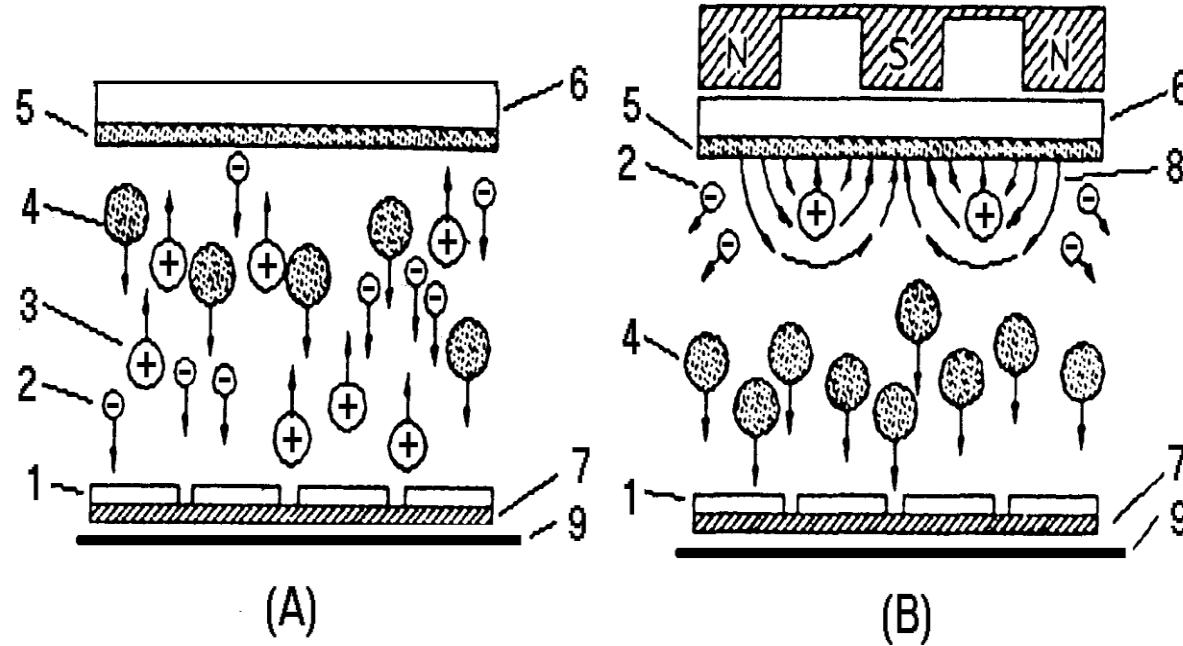


# *Sputtering (pulverização catódica)*



Uma das vantagens obtidas com plasma é a possibilidade de controlar o movimento das partículas pela aplicação de campos elétricos e/ou magnéticos.

# Deposição de filmes por *sputtering*



- 1-Substratos
- 2-Elétrons
- 3-Ions de Argônio
- 4-Átomos ejetados do alvo
- 5-Alvo

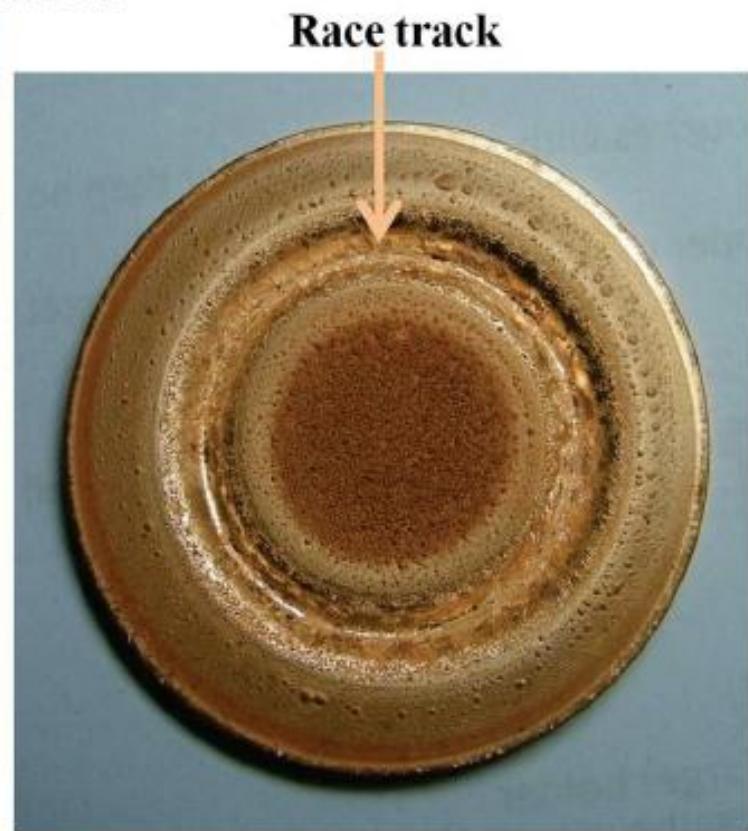
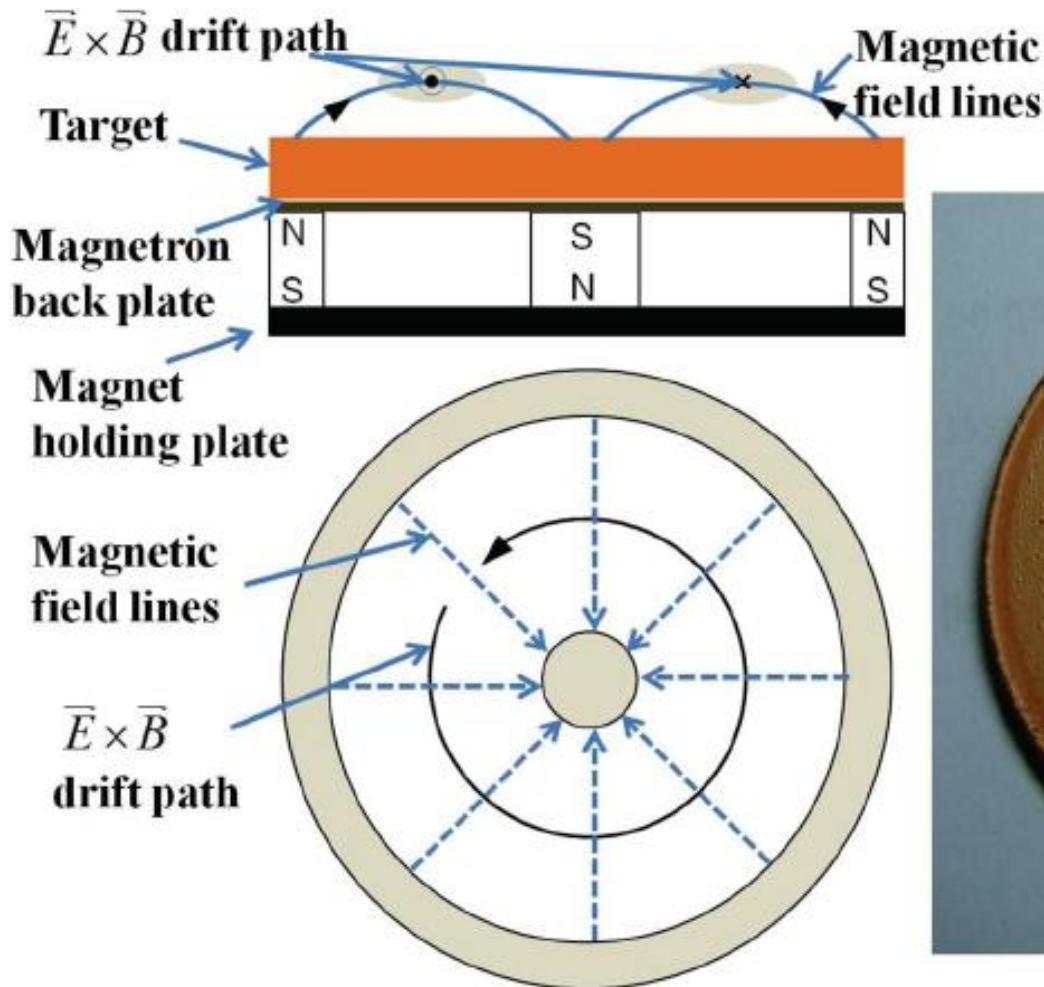
- 6-Catodo
- 7-Porta-substratos
- 8-Linhas de campo magnético
- 9-Anodo

# *Magnetron sputtering*

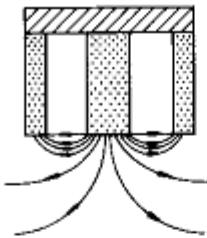


USP – Cortesia do Prof. Abel Recco

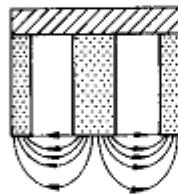
# Zona de erosão



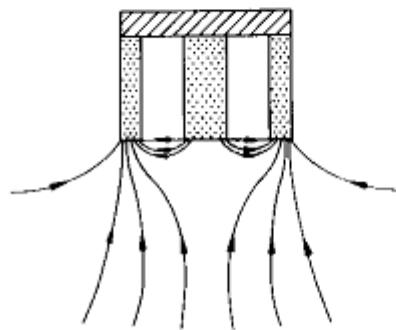
# Campo magnético



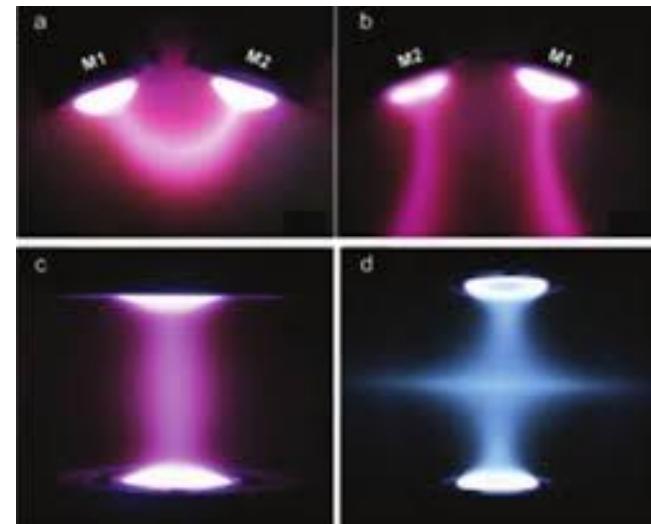
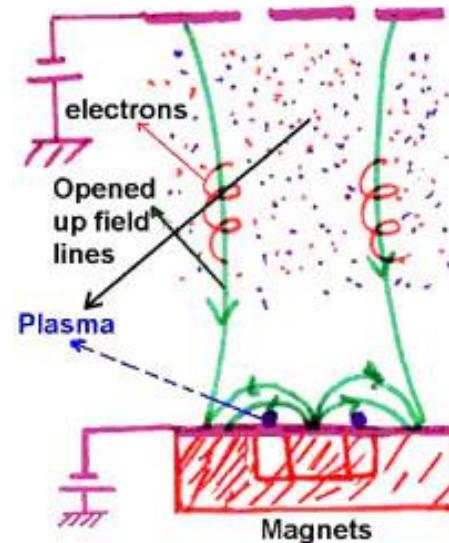
TYPE I  
 $K < 1$



INTERMEDIATE  
 $K \approx 1$



TYPE II  
 $K > 1$

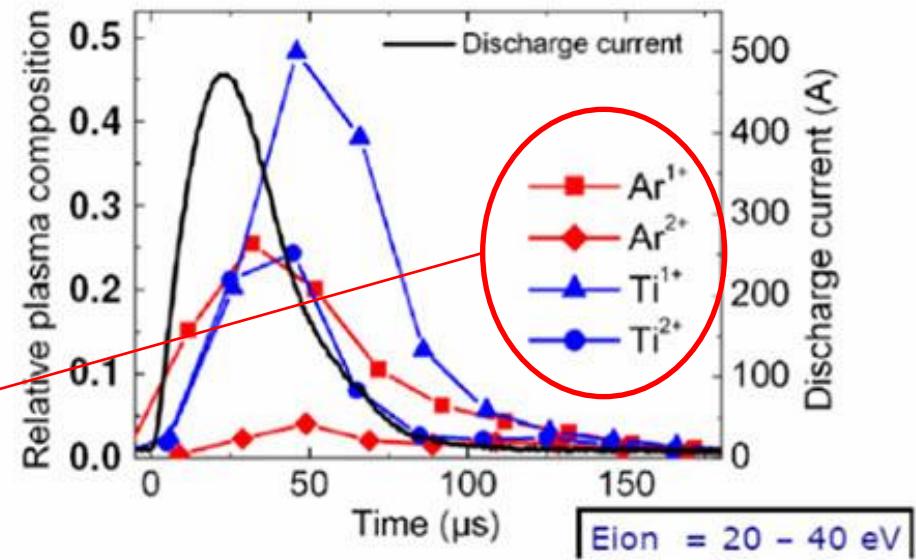


# High Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS)



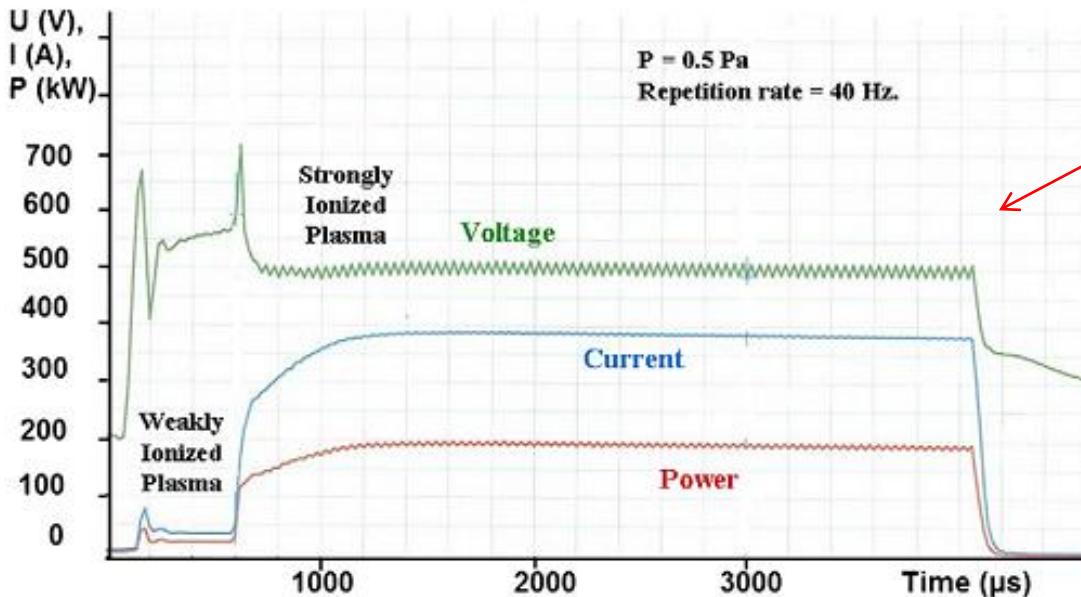
Alto grau de ionização

- Novas fontes de potência
- Alta densidade de plasma
- *Self-sputtering*



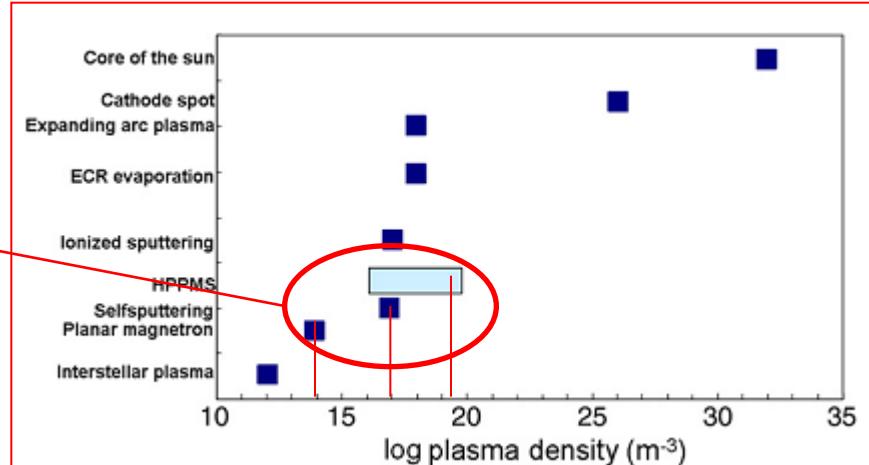
# HiPIMS

## MPP™ Cu Deposition – 4000 µs Pulse



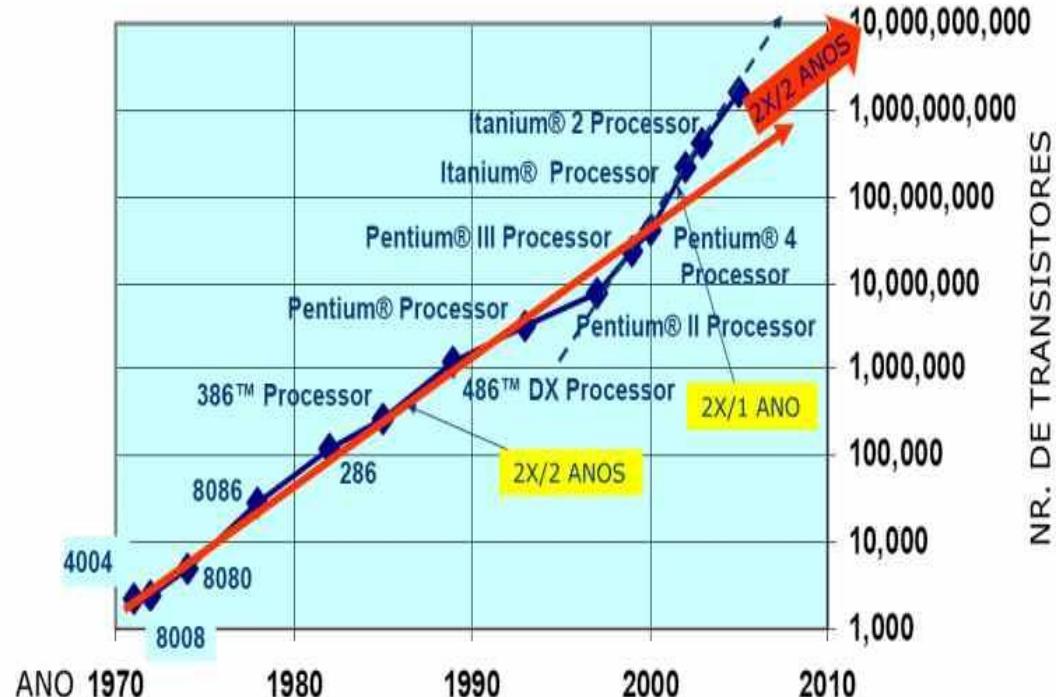
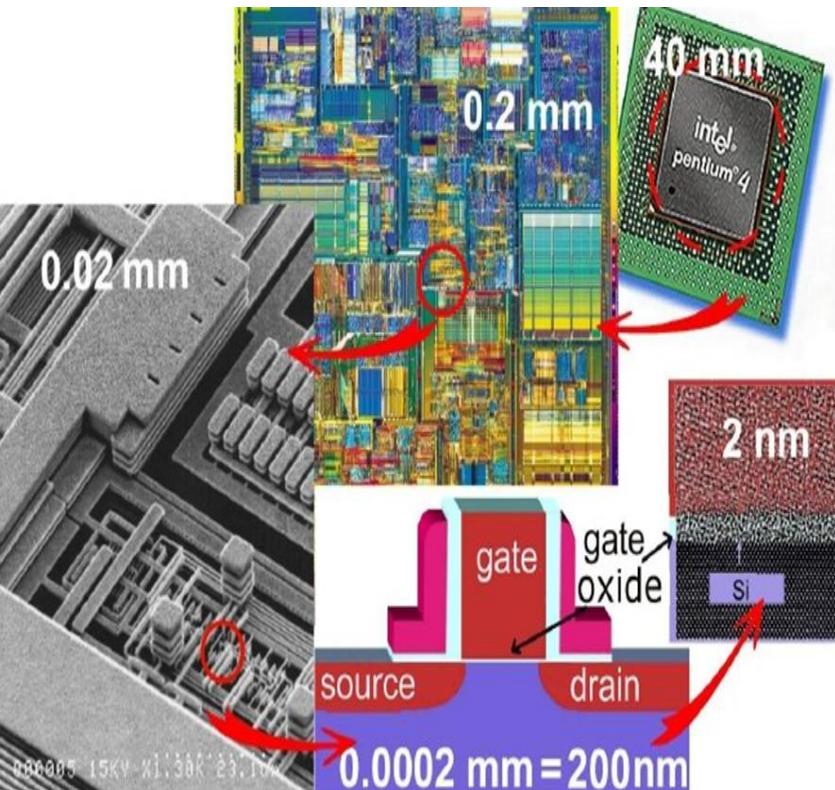
Evolução temporal

Aumento de quase 6 ordens de magnitude quando comparado ao magnetron convencional



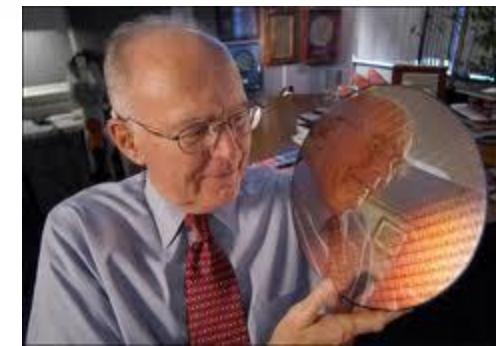
# Aplicações

## Microeletrônica: Evolução dos microprocessadores



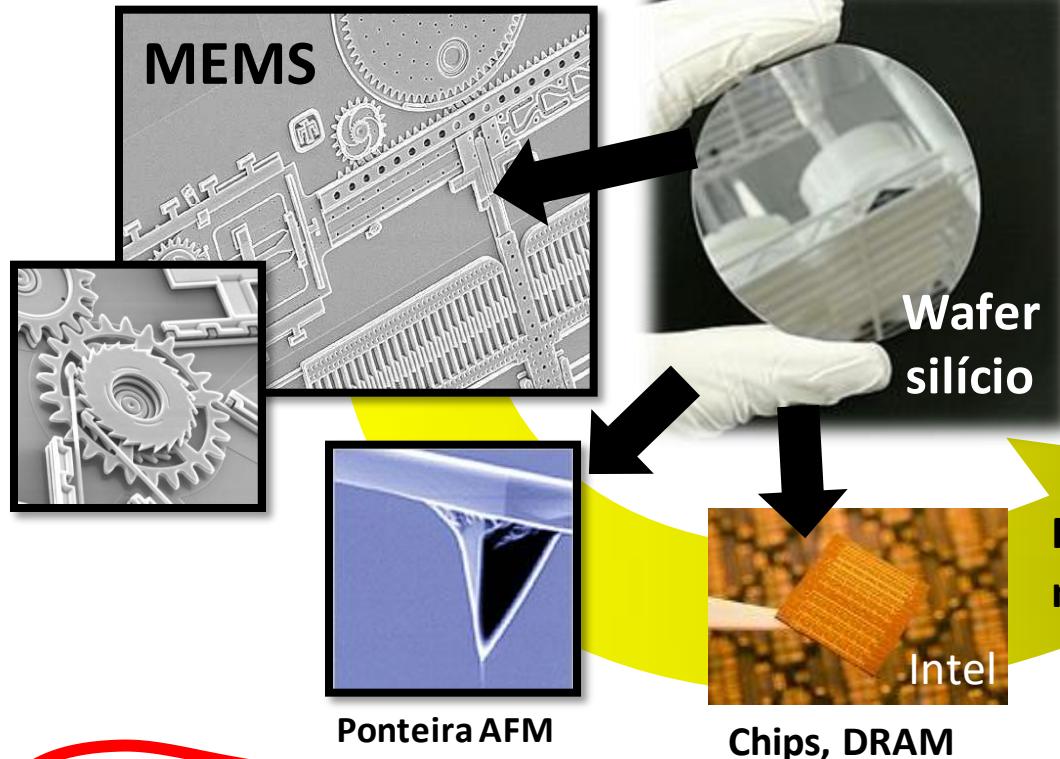
Lei de Moore:

“O número de transistores dos chips teria um aumento de 100%, pelo mesmo custo, a cada período de 18 meses.”



# Aplicações

## Microeletrônica: Processo de microfabricação



Processos de  
microfabricação

- úmida;
- seca.

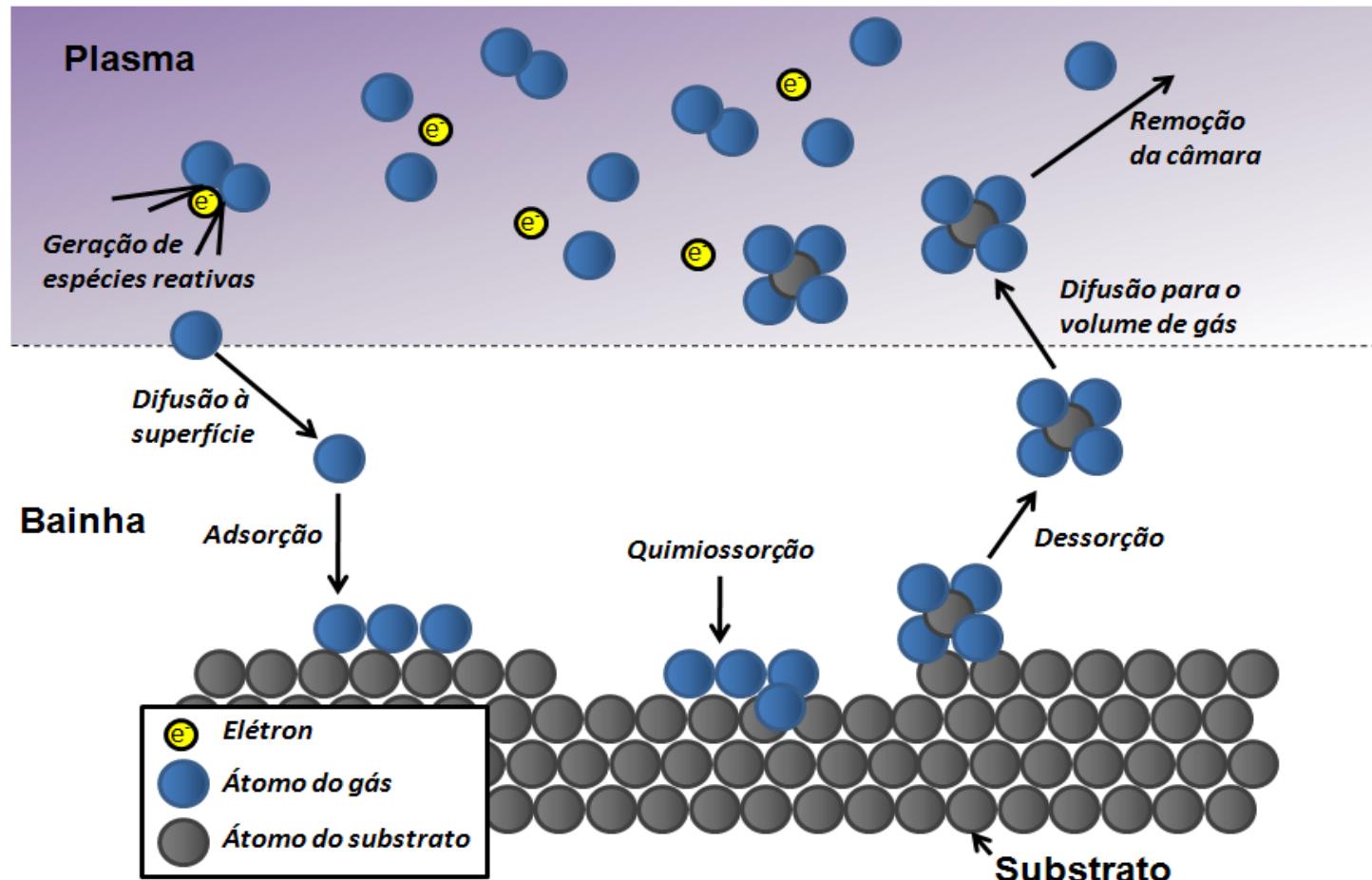


Caract.  
requeridas

- elevada anisotropia;
- alta taxa de corrosão;
- razão-de-aspecto.

# Corrosão a plasma

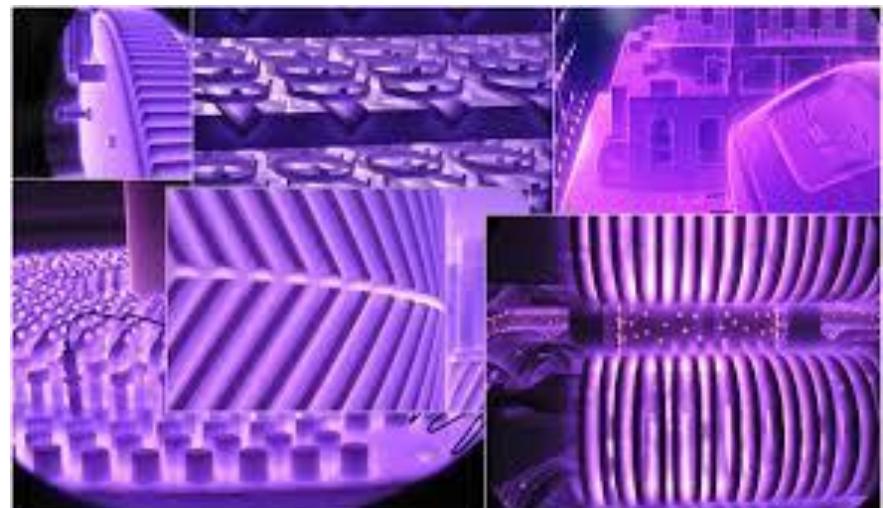
## Mecanismos básicos do processo de corrosão a plasma



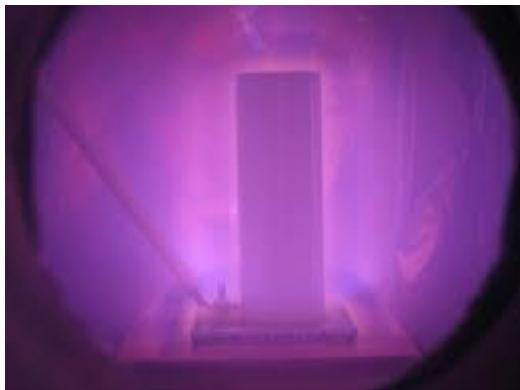
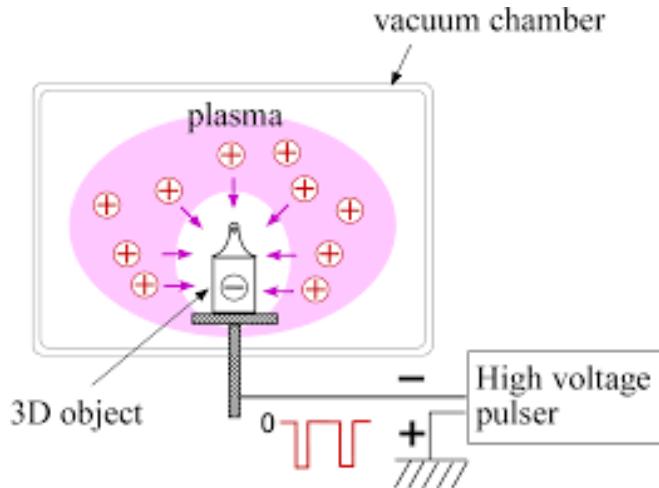
# Nitretação a plasma



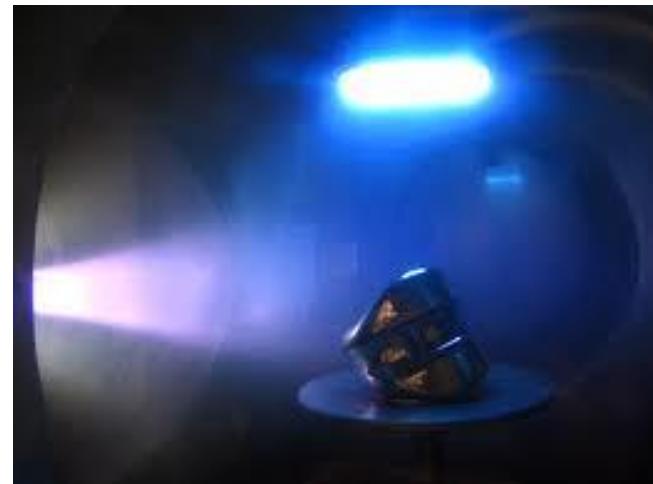
- Altera a superfície de peças metálicas, melhorando propriedades como dureza, resistência ao desgaste, resistência a corrosão, etc.
- Ocorre a difusão de nitrogênio no material devido às altas temperaturas.
- Opera em temperaturas menores do que a nitretação convencional.
- Menos agressivo ao meio ambiente.



# Implantação iônica por plasma



- Pulsos de alta tensão são aplicados à peça sendo tratada.
- Os íons gerados no plasma são implantados no material.
- Esta técnica pode ser usada para dopagem.



# Modificação superficial por plasma



- Pode ser realizada em baixa pressão ou em pressão atmosférica
- Altera a molhabilidade de superfícies.
- Aplicável a polímeros, metais e cerâmicas.
- Ativa quimicamente a superfície.

# Combustão assistida por plasma

## Efeitos térmicos

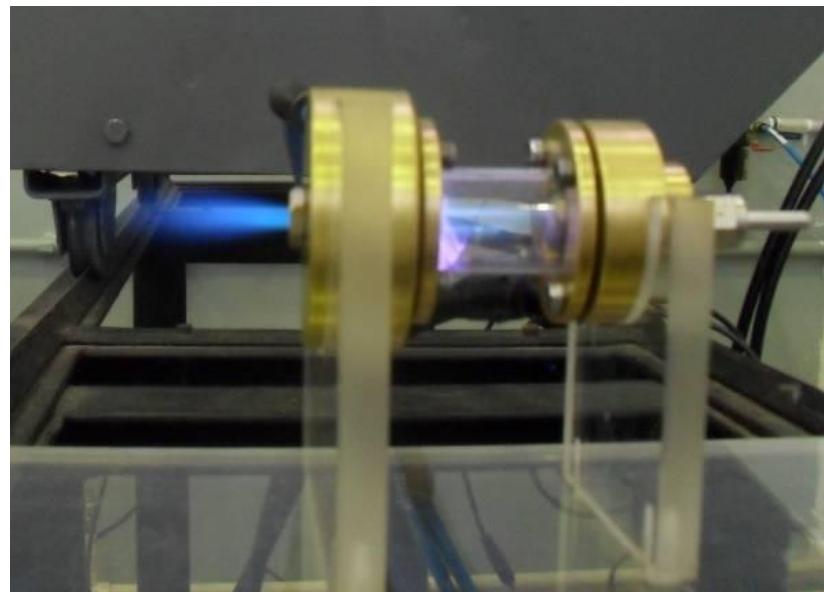
- *Aumento da reatividade*

## Efeitos de transporte

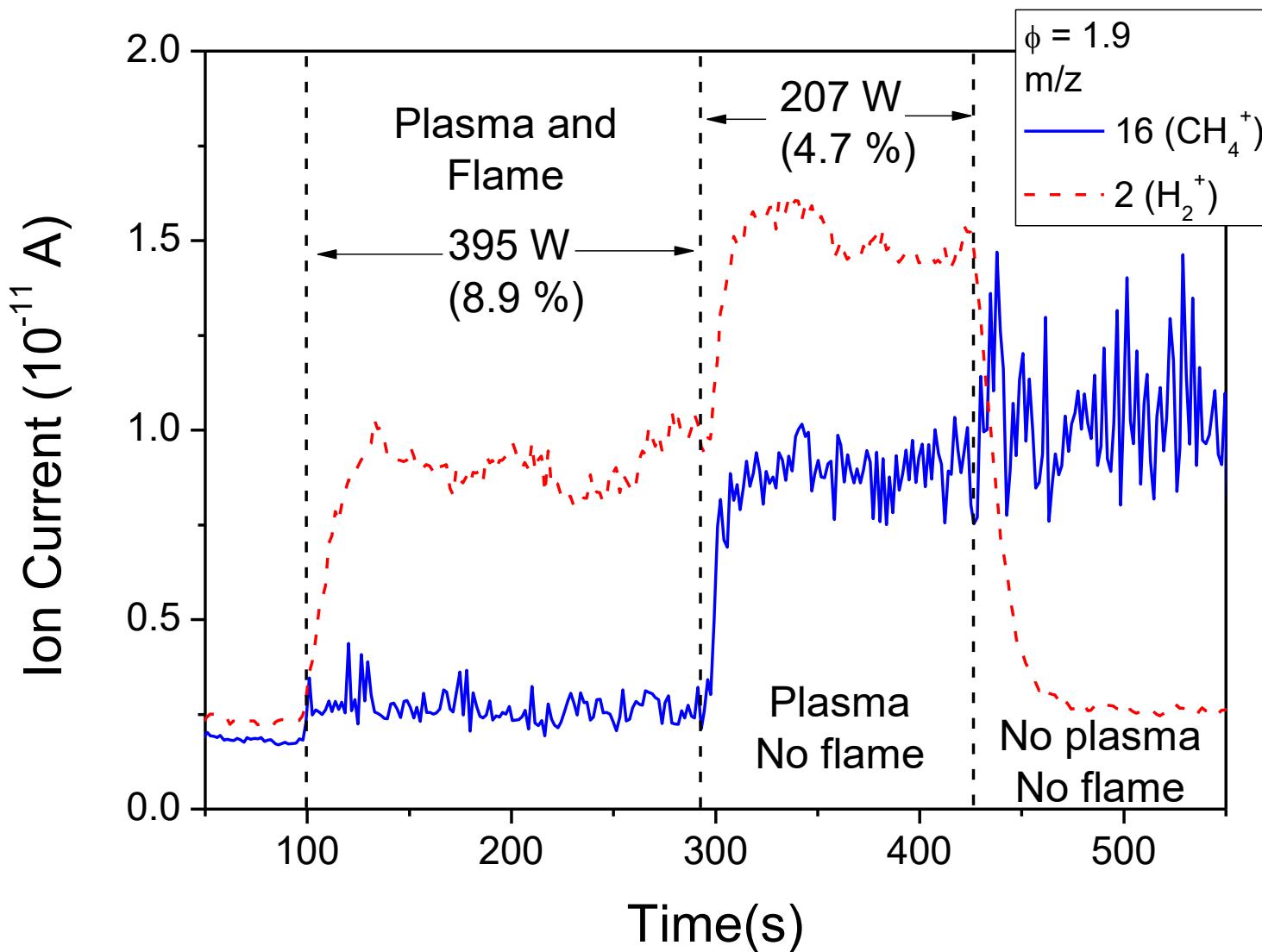
- *Vento iônico*

## Efeitos cinéticos

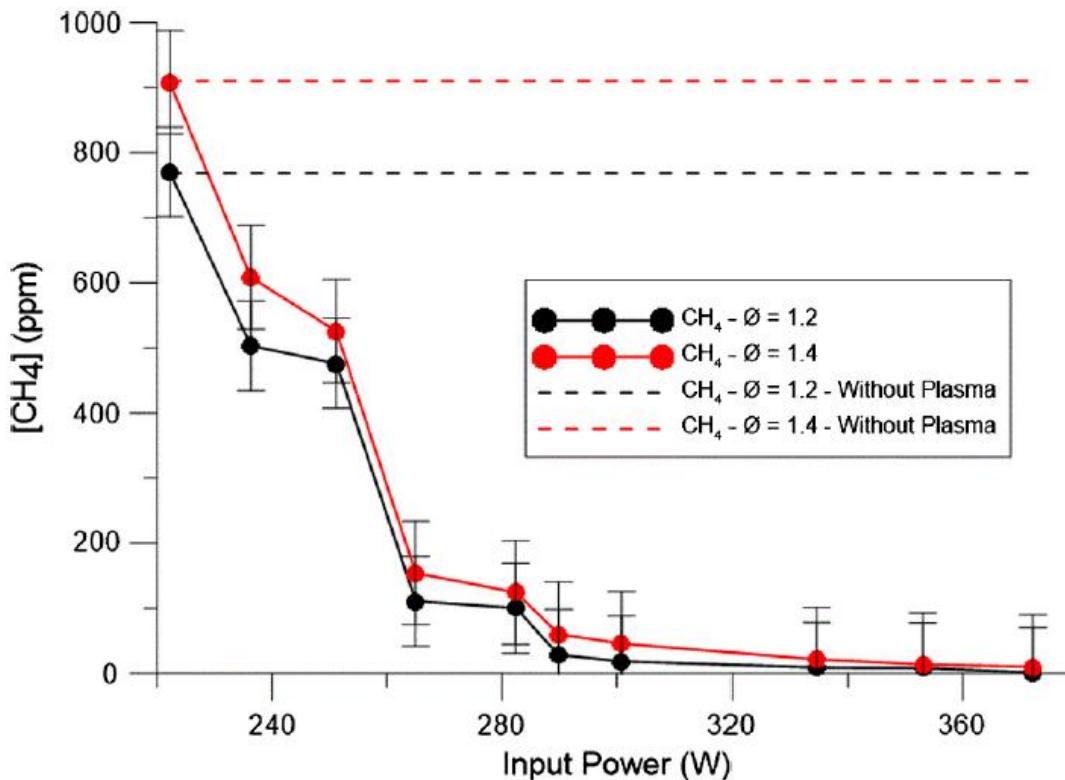
- *Geração de radicais*



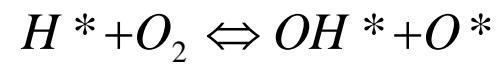
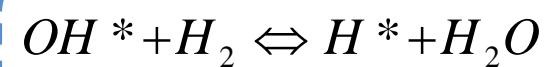
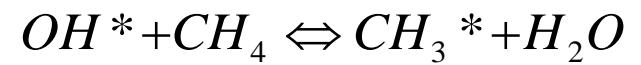
# Espectrometria de massas



# Emissões de hidrocarbonetos

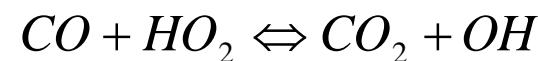
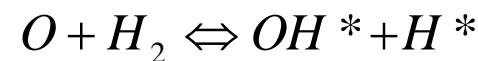
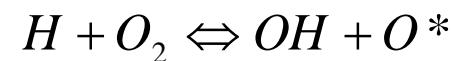
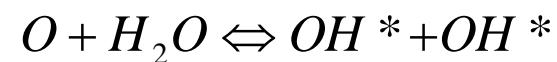
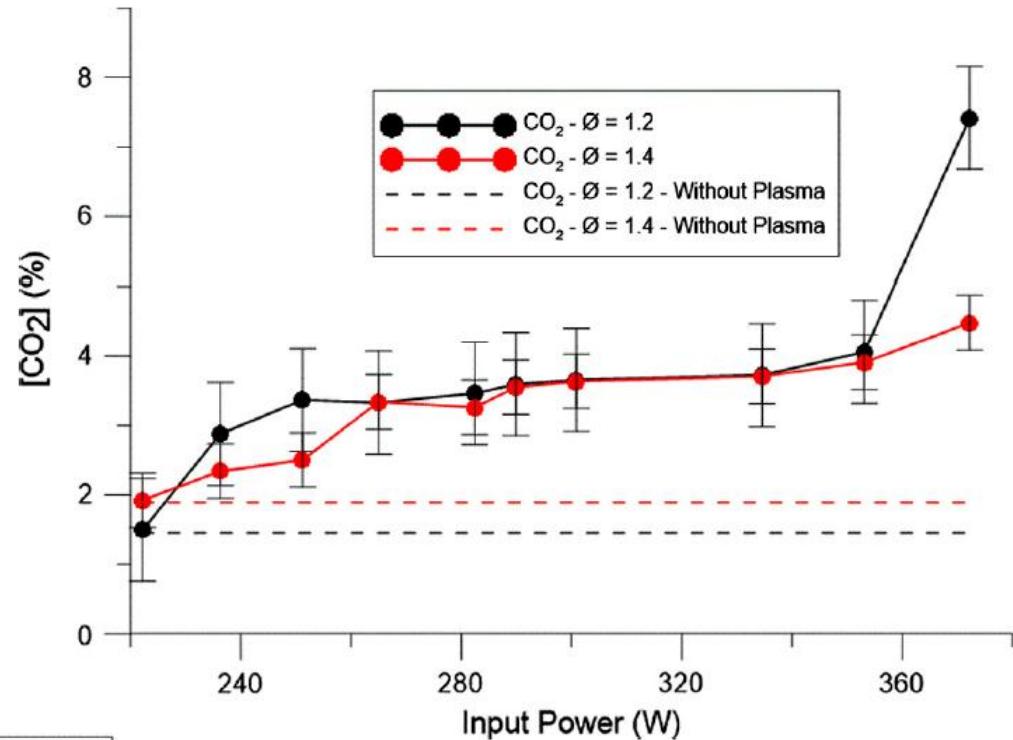
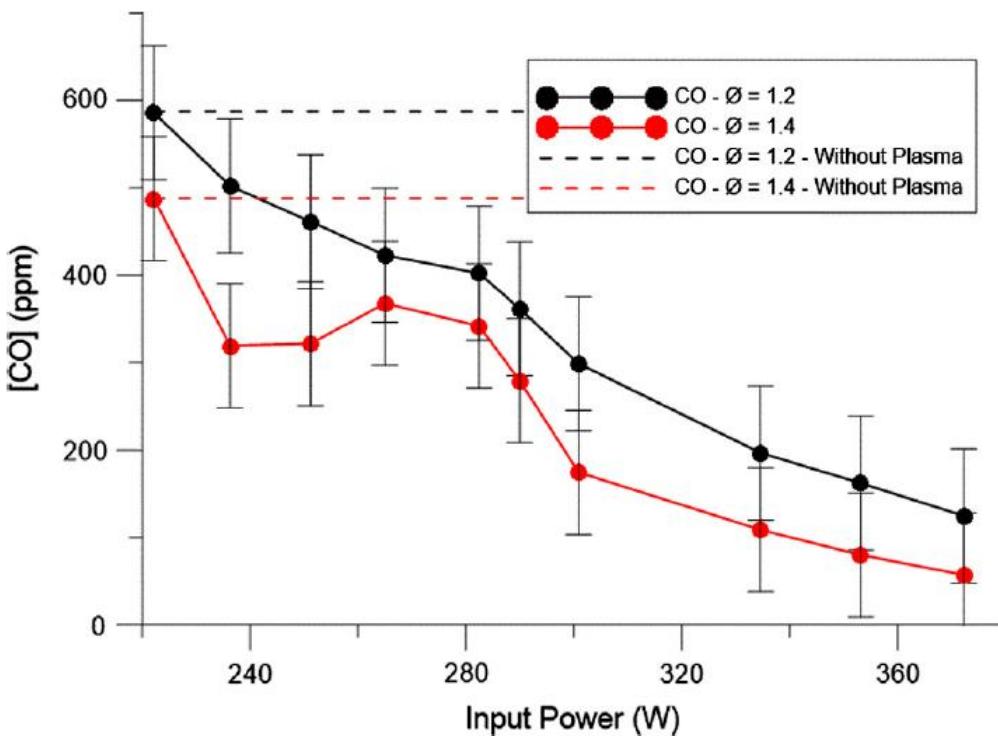
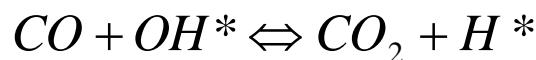


$CH_4$  consumption



H and  $H_2$  addition reduces  $CH_4$  concentration

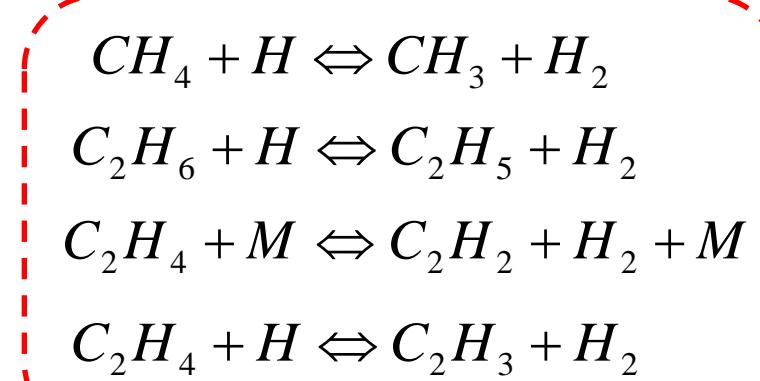
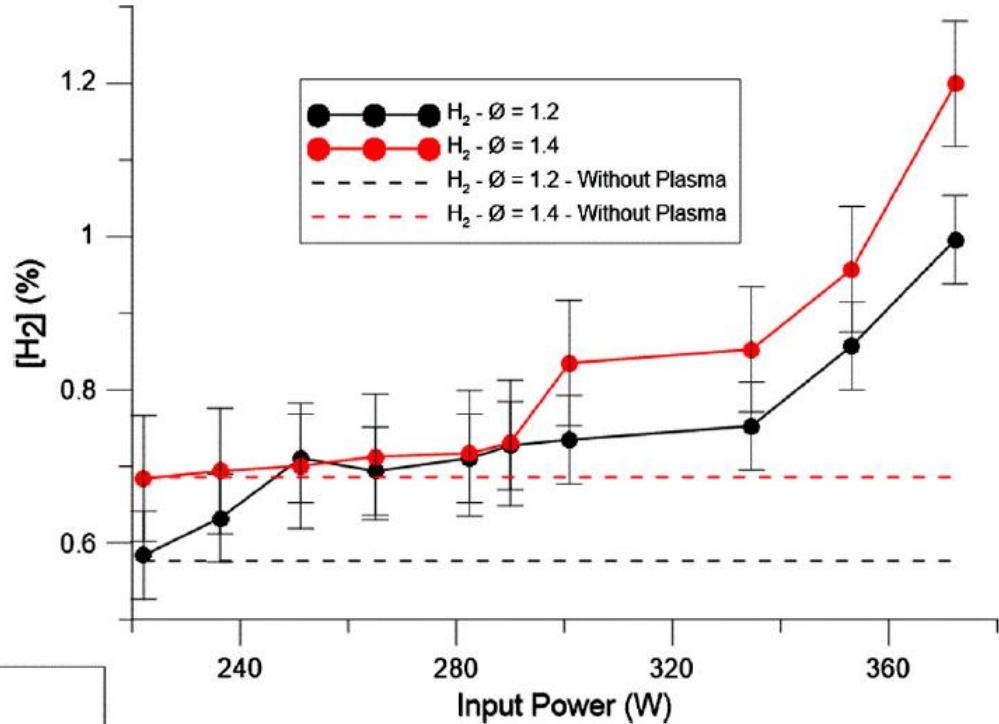
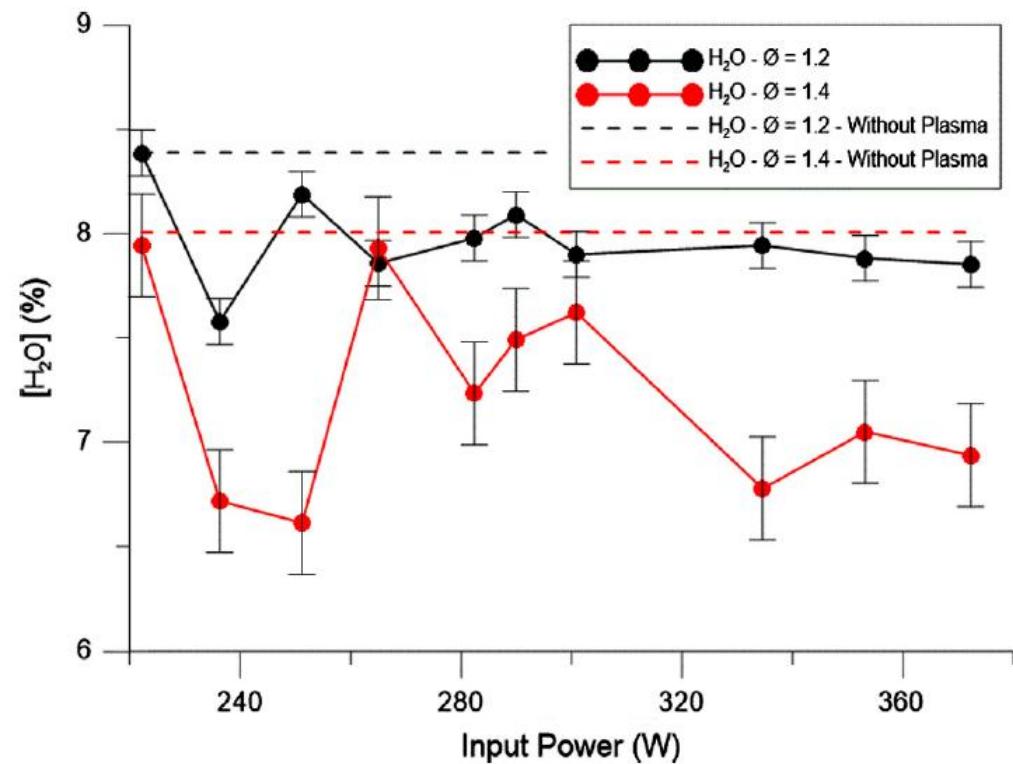
# Emissões de CO e CO<sub>2</sub>



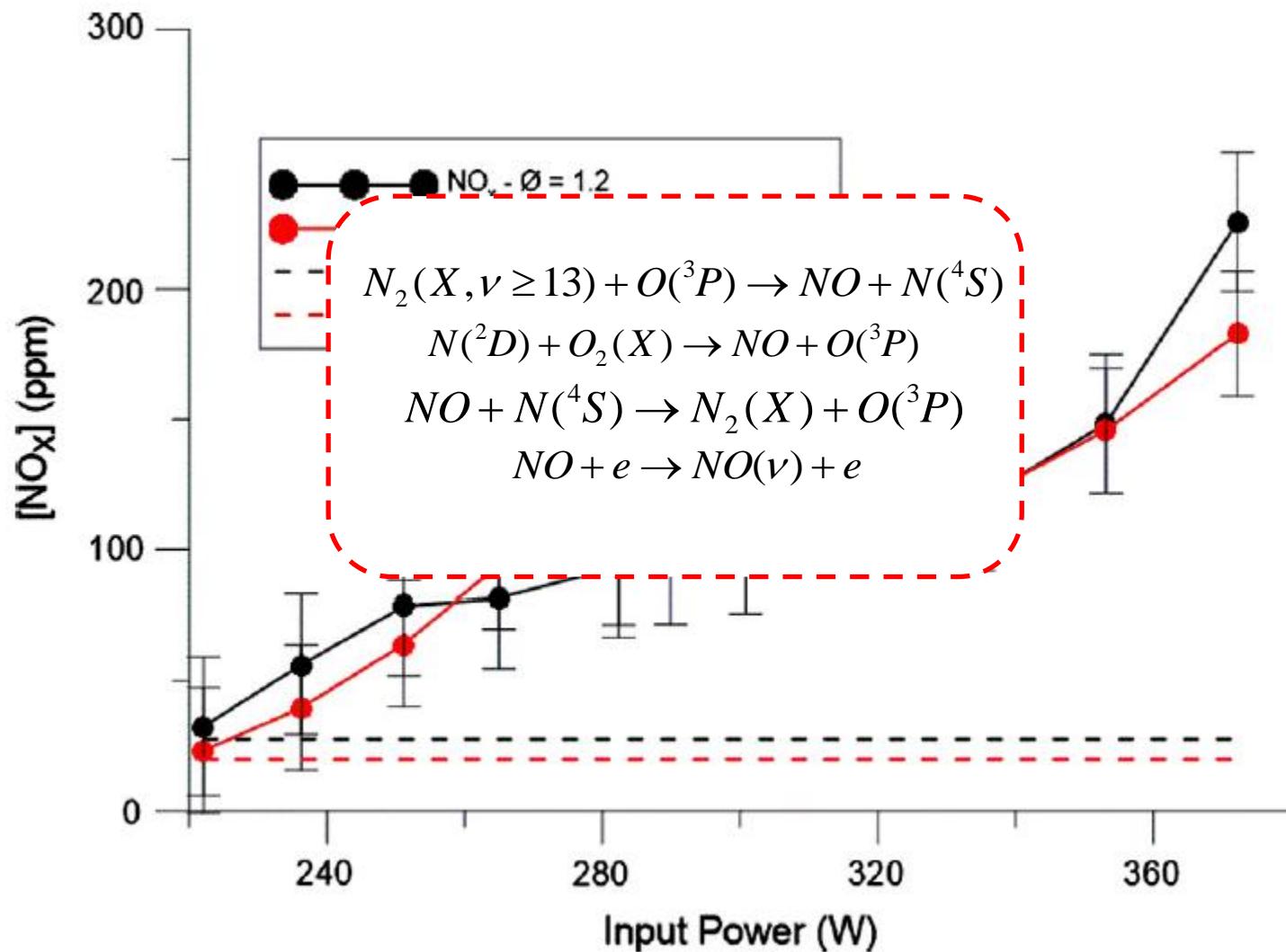
With H<sub>2</sub>

# Produção de H<sub>2</sub>

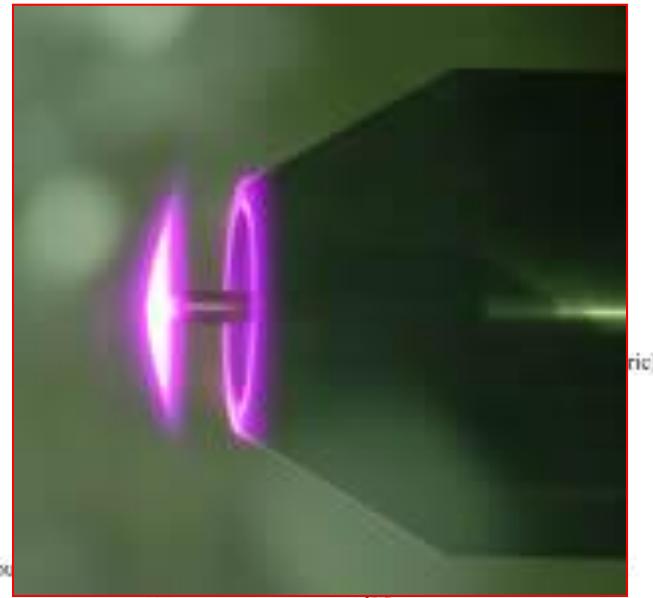
- Dissociação de hidrocarbonetos
- Dissociação de H<sub>2</sub>O?



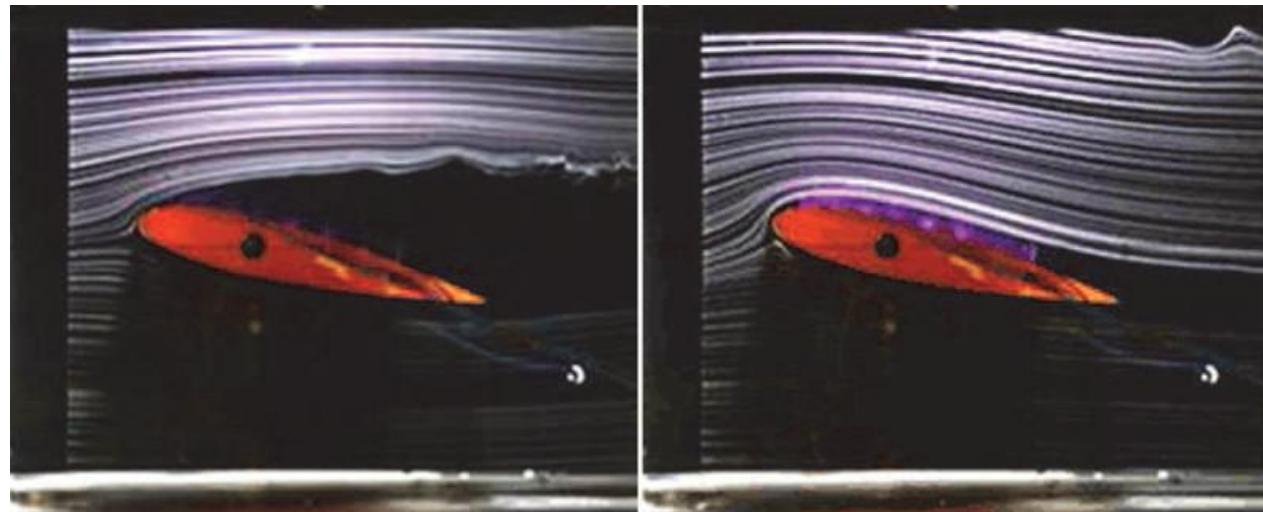
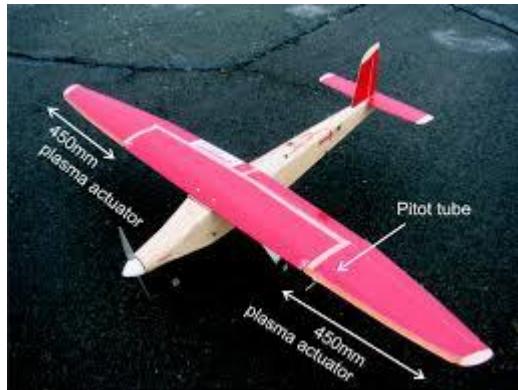
# Emissões de NO<sub>x</sub>



# Controle aerodinâmico

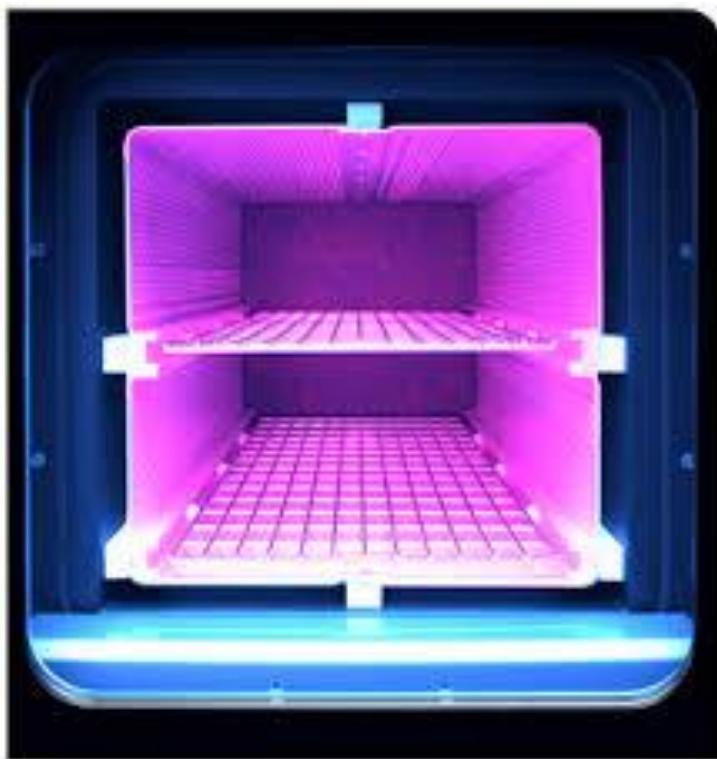


- Descargas podem alterar o fluxo de gases, devido a efeitos como vento iônico e mudanças na densidade do gás.
- Descargas “superficiais” são usadas para controle aerodinâmico, como DBD e “arco” deslizante.

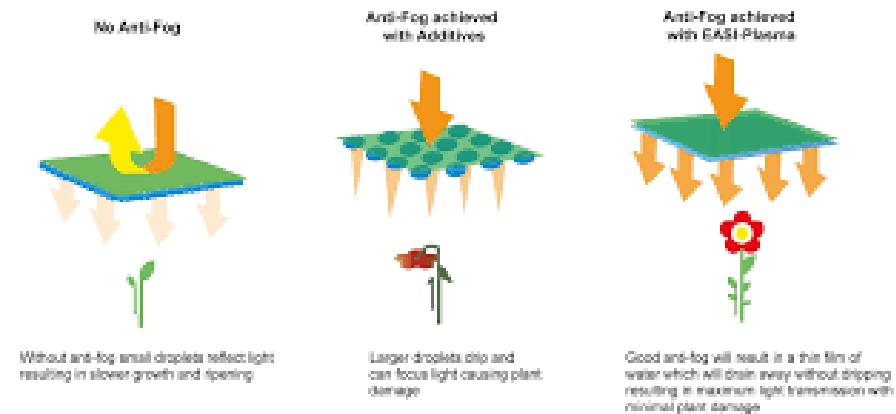


# Esterilização a plasma

- Efeitos do plasma, como aquecimento, emissão de UV e de radicais podem ser usados para esterilização de materiais.



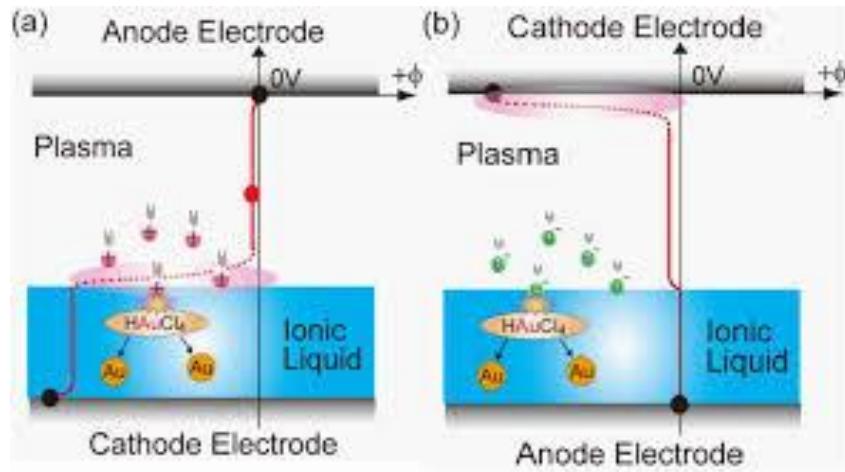
# Agricultura a plasma



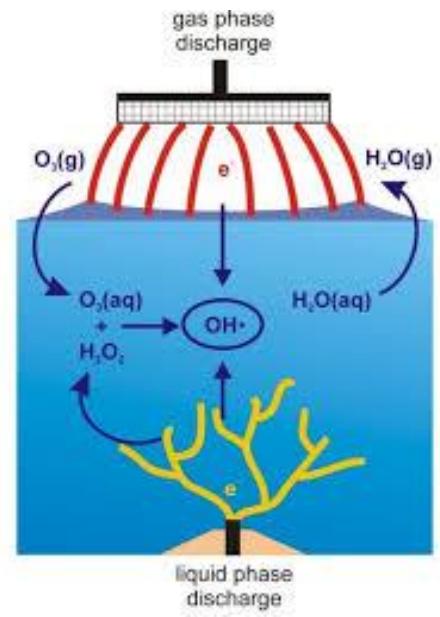
# Medicina a plasma



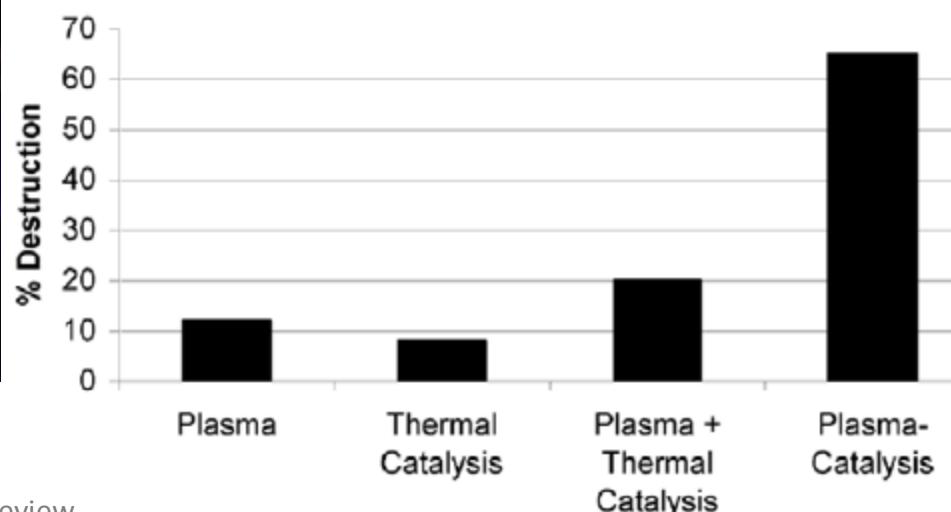
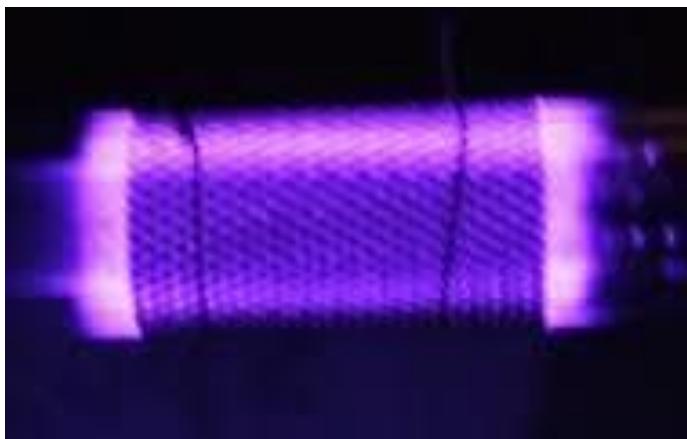
# Plasmas em líquidos



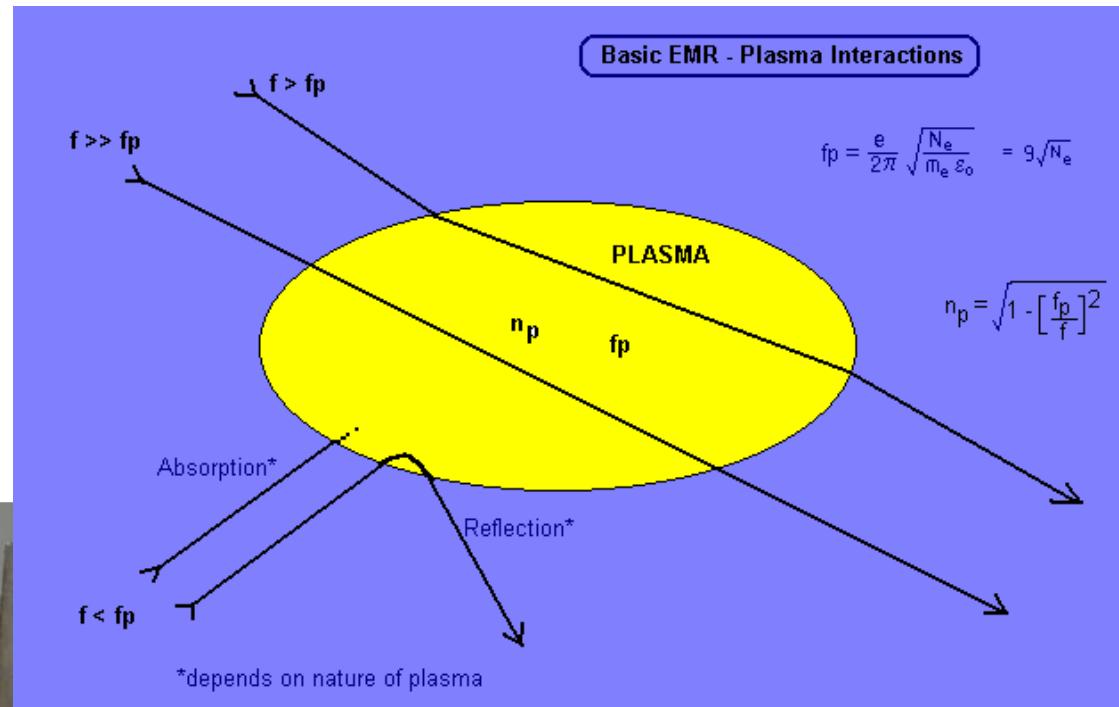
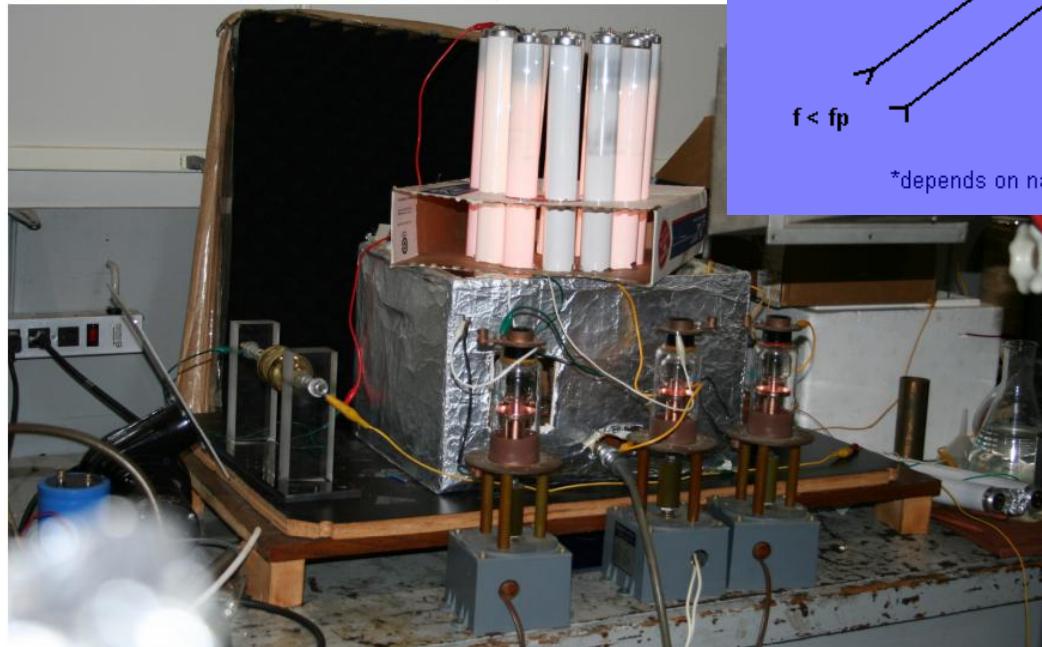
- Plasmas sobre líquidos e dentro de líquidos vêm sendo estudados para tratamento de poluentes e síntese de nanomateriais.



# Catálise a plasma



# Antenas a plasma



- Plasmas podem funcionar como refletores para frequências abaixo da frequência de plasma.
- A absorção ou reflexão depende da frequência de colisão.

# Raios e relâmpagos

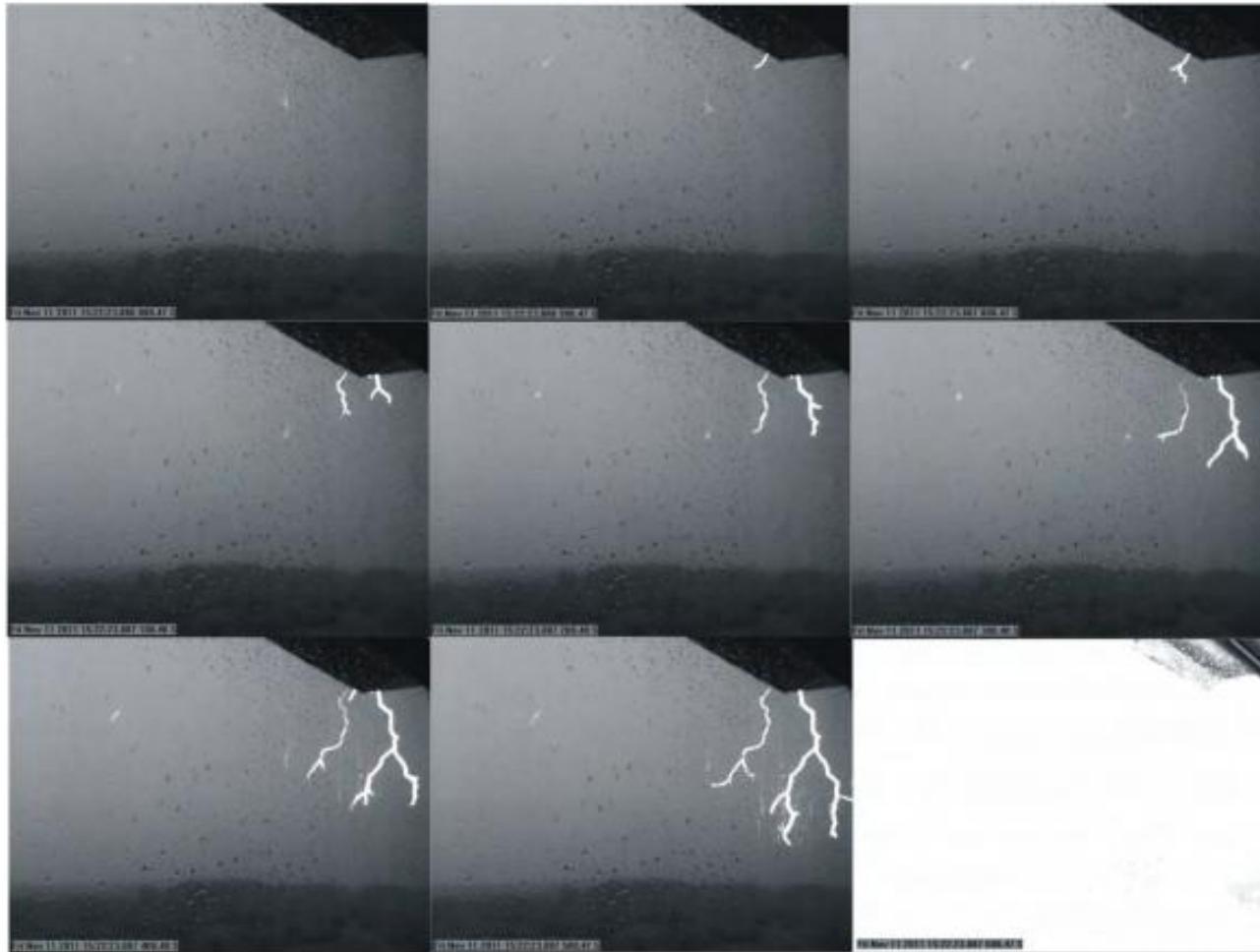
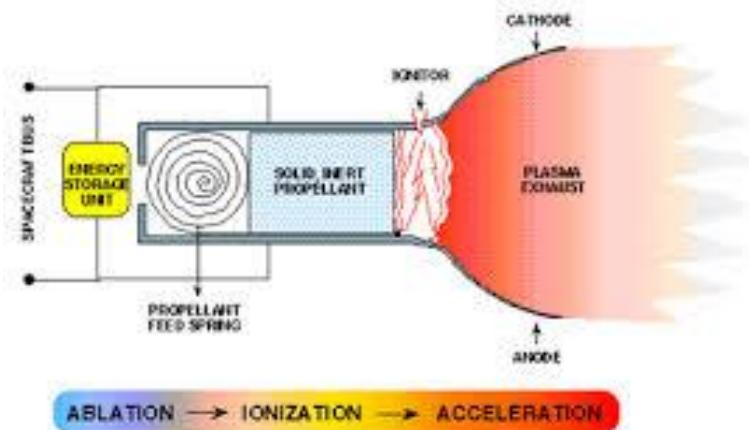
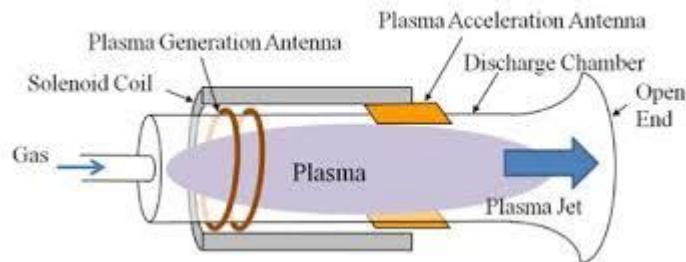
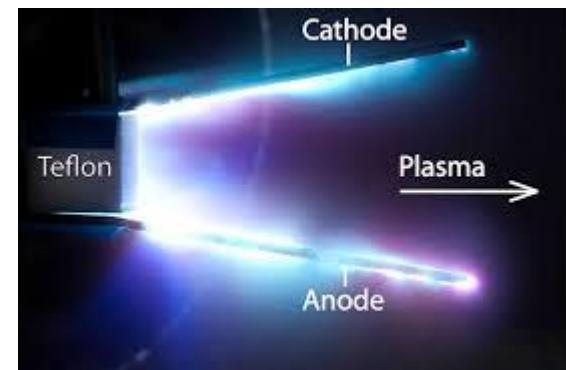
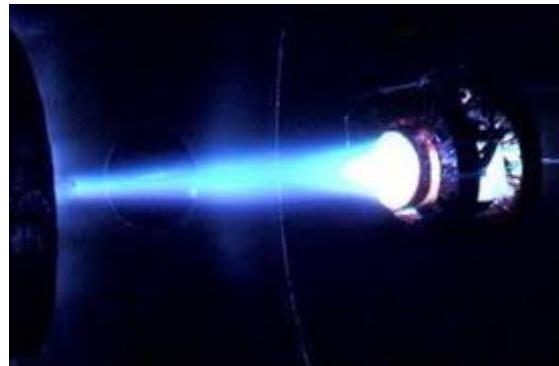


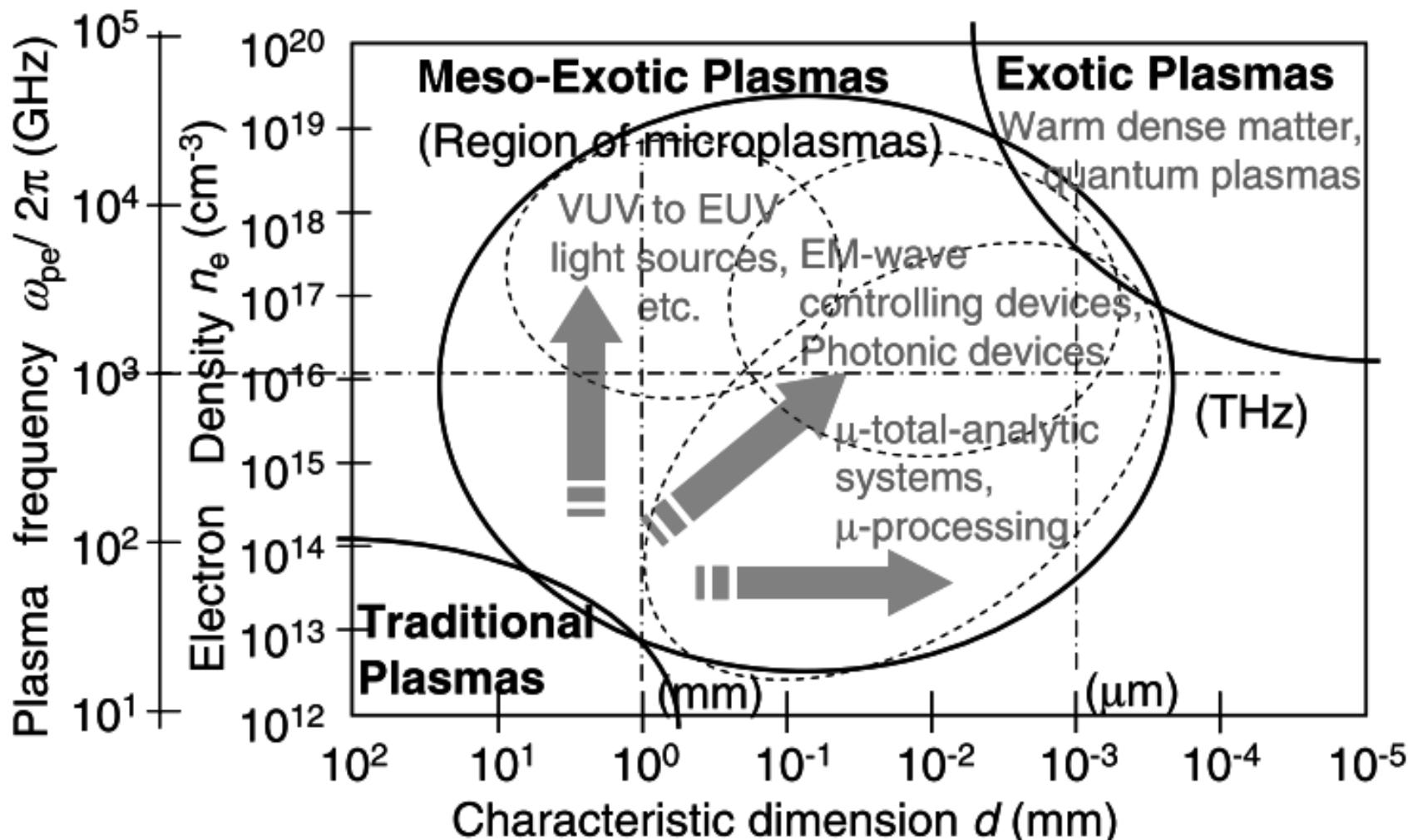
Figura 2.3 Sequência de imagens obtidas com a câmera Phantom V310

# Propulsores a plasma

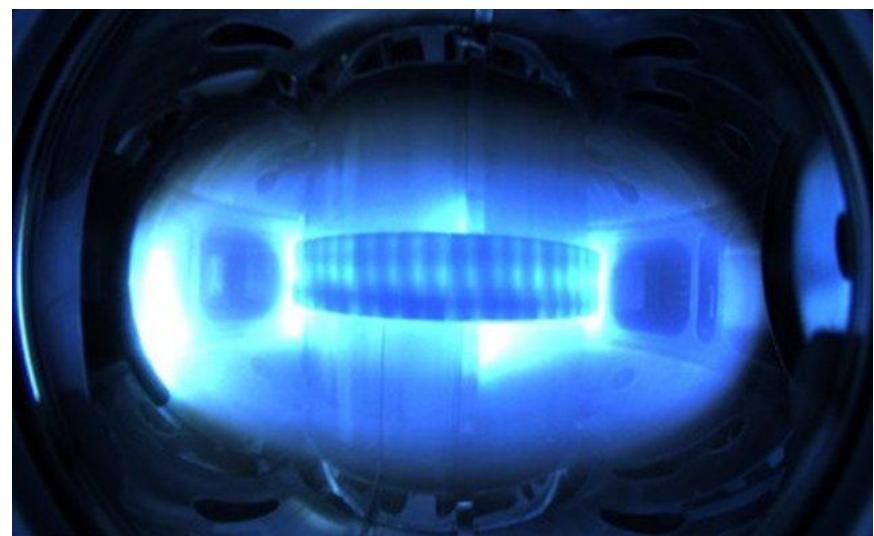
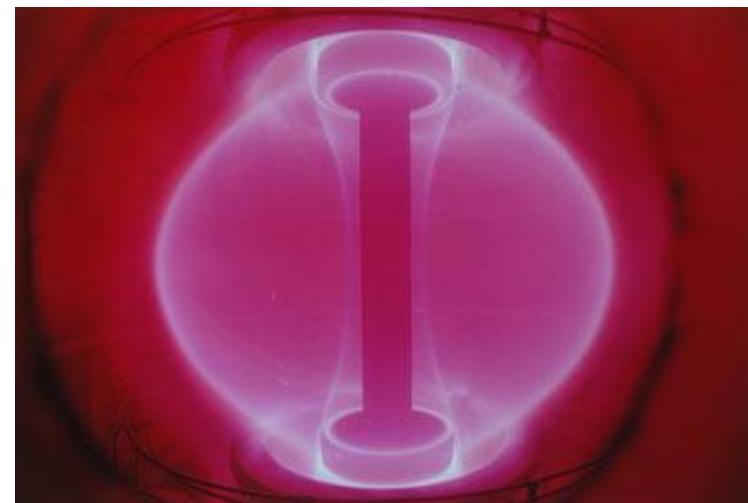
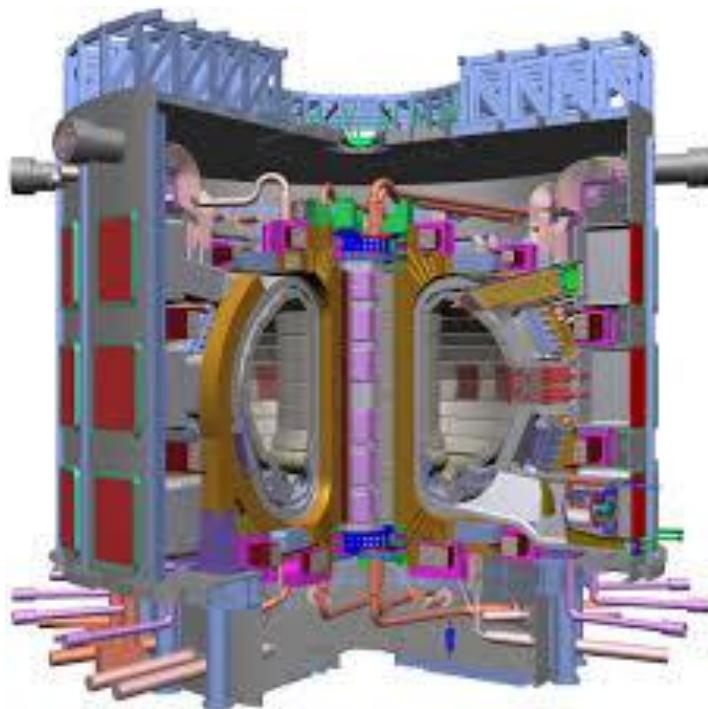


- Baixo empuxo
- Indicada para ambientes de vácuo

# Microplasmas e plasmas quânticos



# Fusão nuclear: plasmas quentes

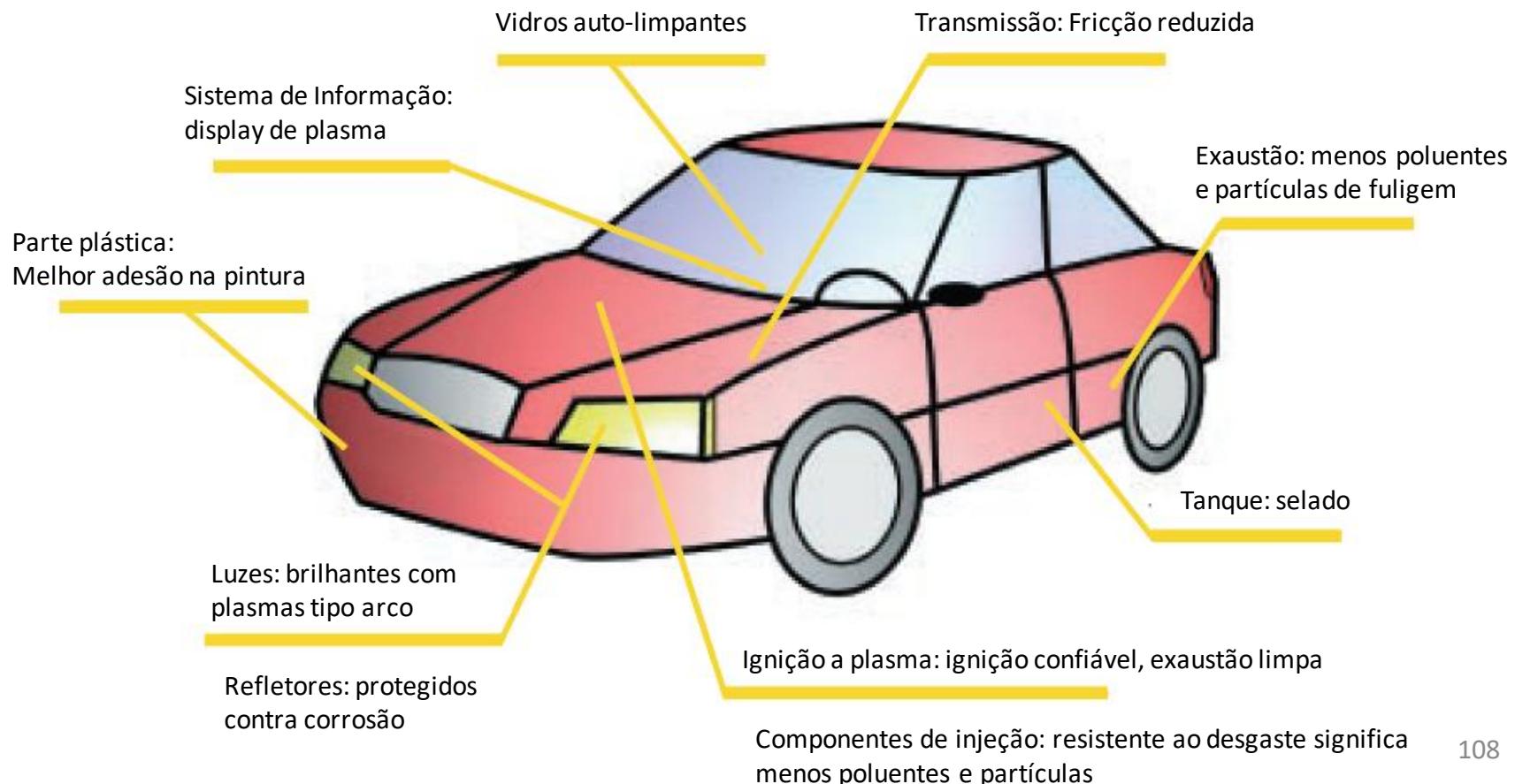


# Aplicações

## Automobilistica:

### Tecnologias de mobilidade ambientalmente aceitáveis

Os fabricantes de automóveis de hoje são obrigados a satisfazer simultaneamente as seguintes exigências:  
A maior mobilidade deve ser conciliada com menor consumo de energia e baixas emissões de poluentes. A “Tecnologia de Plasmas” pode atender tal demanda, veja:



# Pesquisa com plasmas frios no Brasil



# Empresas envolvidas com tecnologia de plasmas no Brasil



# Laboratório de Plasmas, Filmes e Superfícies



- Criado em 1998
- Líder do grupo: Luis César Fontana
- Vice-Líder do grupo: Jacimar Nahorny

Pesquisadores	Instituição	Departamento	Pós-Graduação
Luis César Fontana	CCT-UDESC	Física	PGCEM
Jacimar Nahorny	CCT-UDESC	Física	
Milton José Cinelli	CEART-UDESC	Física	
Abel André Cândido Recco	CCT-UDESC	Física	PGCEM
Julio César Sagás	CCT-UDESC	Física	PPGF
Daniela Becker	CCT-UDESC	Produção	PGCEM
Dianclen do Rosário Irala	Católica - SC		
Diego Alexandre Duarte	UFSC - Joinville		
Joel Stryhalski	IFSC		



### Laboratório de Plasmas, Filmes e Superfícies (LPFS)

Histórico  
▶ Equipe  
▶ Publicações  
Projetos  
Apresentações  
Infraestrutura  
Agendamento  
Prêmios

Ligado ao Departamento de Física do CCT-UDESC, o laboratório se caracteriza pelo seu caráter multidisciplinar, agregando profissionais não apenas da Física, mas também da Química e de diversas Engenharias. Dentre os principais objetivos do grupo está a formação de recursos humanos, o que evidencia-se pela grande número de alunos de iniciação científica que já passaram pelo laboratório.

Dentro desta filosofia, o laboratório tem produzido diversos trabalhos de mestrado e doutorado no [Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do CCT-UDESC](#) e, recentemente, passou a produzir trabalhos ligados ao [Programa de Pós-Graduação em Física do CCT-UDESC](#).

### Linhas de pesquisa

Deposição de filmes finos por pulverização catódica (*magnetron sputtering*)  
Tratamento termoquímicos por plasma (nitretação, carbonitretação, etc)  
Polimerização por plasma  
Ativação e funcionalização de superfícies por plasma  
Diagnóstico de plasmas por espectroscopia ótica  
Modelamento e simulação de deposição de filmes finos

## Trabalhos em andamento

- Doutorado: 3
- Mestrado: 12
- Graduação: 4
- Ensino médio: 1

## Trabalhos concluídos

- Doutorado: 2
- Mestrado: 13
- Iniciação científica > 50 (37 alunos)

## Técnicos

Julio Cesar de Oliveira Fermino

# OBRIGADO

Contato: [julio.sagas@udesc.br](mailto:julio.sagas@udesc.br)  
[www.cct.udesc.br/?id=1862](http://www.cct.udesc.br/?id=1862)

