

# Física Experimental IV

Prof. Antonio Domingues dos Santos  
adsantos@if.usp.br  
Ramal: 6886  
Mário Schemberg, sala 205

Prof. Leandro Barbosa  
lbarbosa@if.usp.br  
Ramal: 7157  
Ala I, sala 225

Prof. Henrique Barbosa  
(**coordenador**)  
hbarbosa@if.usp.br  
Ramal: 6647  
Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin  
carlin@dfn.if.usp.br  
Ramal: 6820  
Pelletron

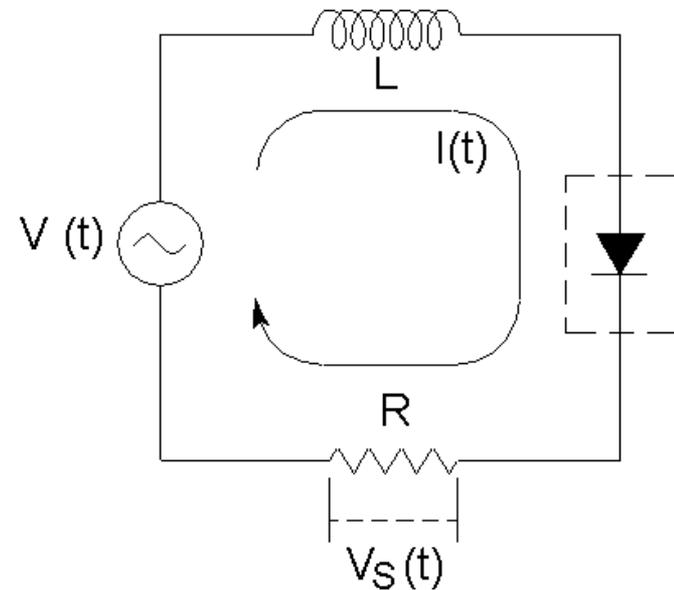
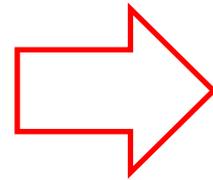
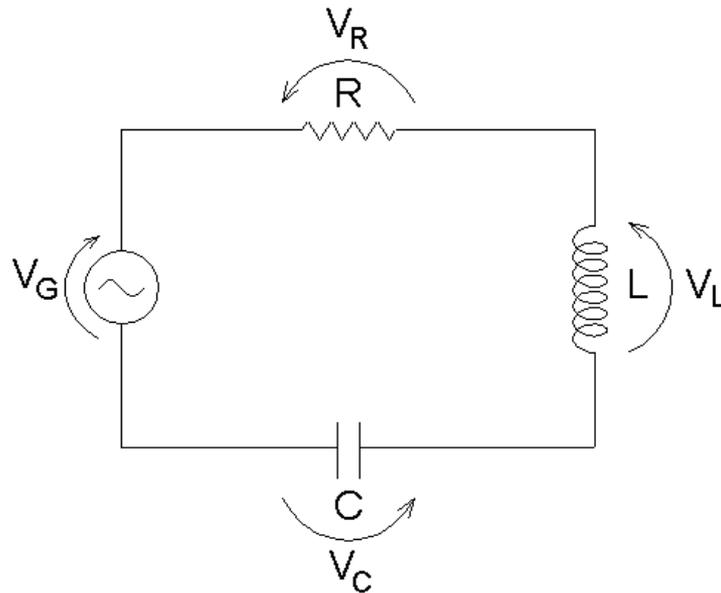
Prof. Paulo Artaxo  
artaxo@if.usp.br  
Ramal: 7016  
Basílio, sala 101

## Aula 5 - Experiência 1 Circuitos CA e Caos 2013

<http://lababerto.if.usp.br/>

# Objetivos Para as Próximas Semanas

- Estudar o circuito RLD (ou RLC não linear)



- Semana 1

- Teoria de caos e experimentos computacionais

- Semana 2

- Medidas experimentais com RLD



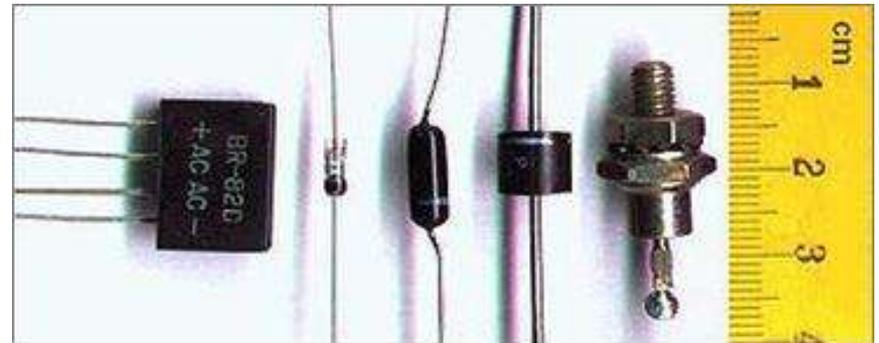
# Aula de Hoje



- Circuito RLD
  - O que é um diodo?
  - Quais as semelhanças com o RLC ?
- Caos com o RLD
  - Diagrama de bifurcações experimental!

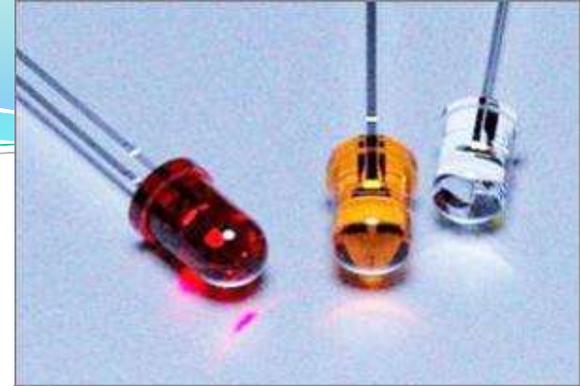
# O que é um Diodo?

- O diodo é o dispositivo semicondutor mais simples.
- Um semicondutor é um material com uma habilidade variável para conduzir corrente.
- A maioria dos semicondutores é feita de condutores ruins misturado com impurezas (átomos de outro material). O processo de adicionar impurezas é chamado de dopagem.



Exemplo: As luzes vermelhas e verdes dos aparelhos eletrônicos são diodos (LED = light emitting diode)

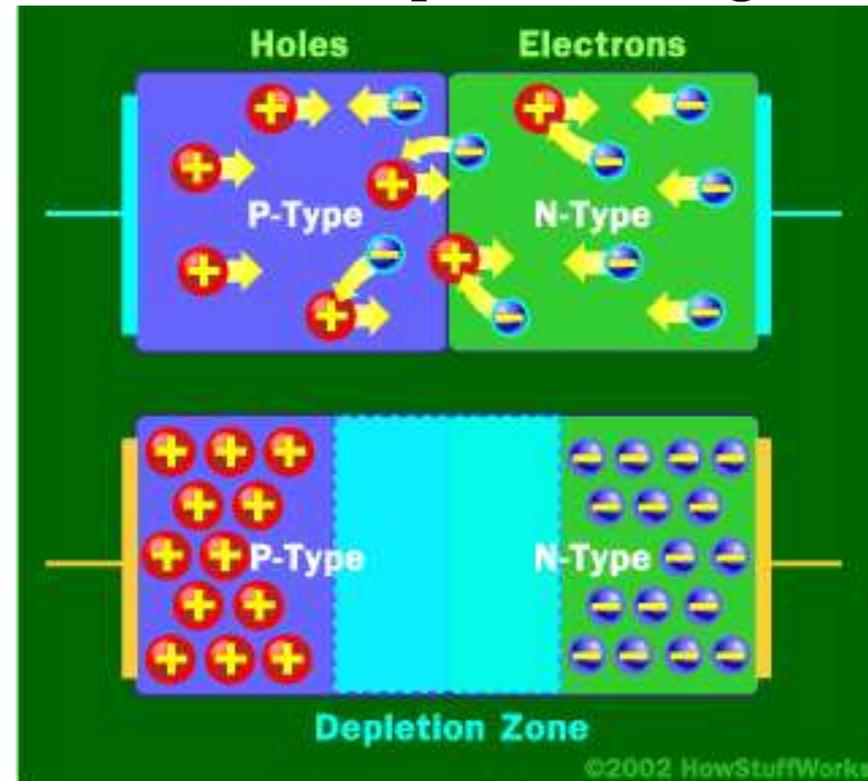
# E os semicondutores?



- No caso de LEDs, o material tipicamente usado é o **alumínio-gálio-arsênico** (AlGaAs).
  - Quando o material está puro, a ligação entre os átomos é completa e não há elétrons livres para conduzir corrente.
  - No material dopado, os átomos adicionais mudam o balanço, adicionando elétrons livres ou criando “buracos” para onde os elétrons podem ir.
  - Nos dois casos o material passa a ser mais condutor!
- Um semicondutor com elétrons extras é chamado de material tipo-N. Os elétrons livres movem-se de uma área com carga negativa para uma com carga positiva.
- Um semicondutor com “buracos” é chamado de material do tipo-P. Os elétrons do material pulam de um buraco para o outro. O resultado é que os buracos parecem se mover da região positiva para a negativa.

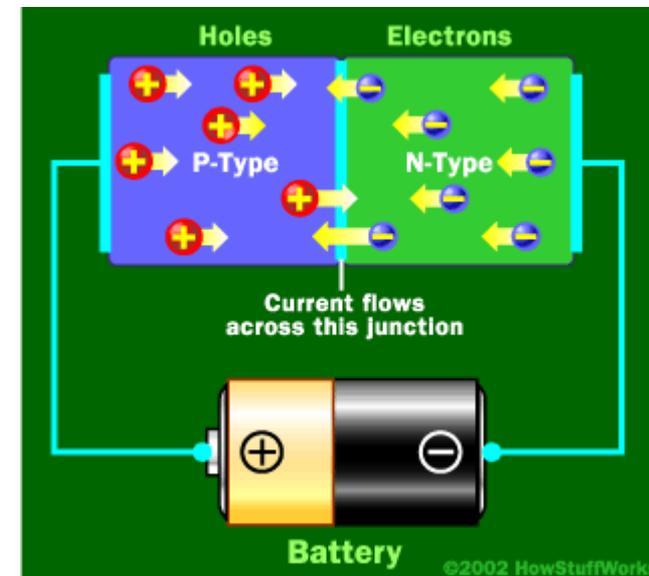
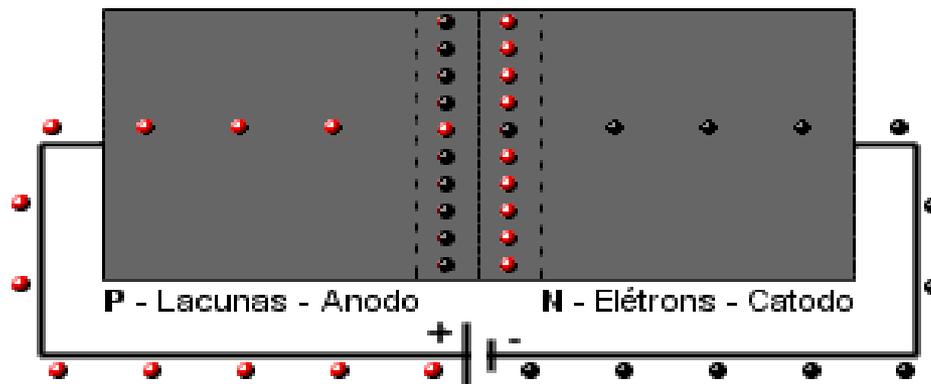
# Como funciona o Diodo?

- Um diodo tem uma região com material tipo-N e outra com material tipo-P, com eletrodos nas extremidades.
  - Este arranjo conduz eletricidade apenas em uma direção.
- Quando não há voltagem aplicada ao diodo, elétrons do material tipo-N enchem os buracos do material tipo-P ao longo da junção.
- Forma-se uma zona de depleção, onde o material semicondutor volta a ser isolante.
- Não passa corrente pois os buracos em excesso estão ocupados pelos elétrons em excesso.



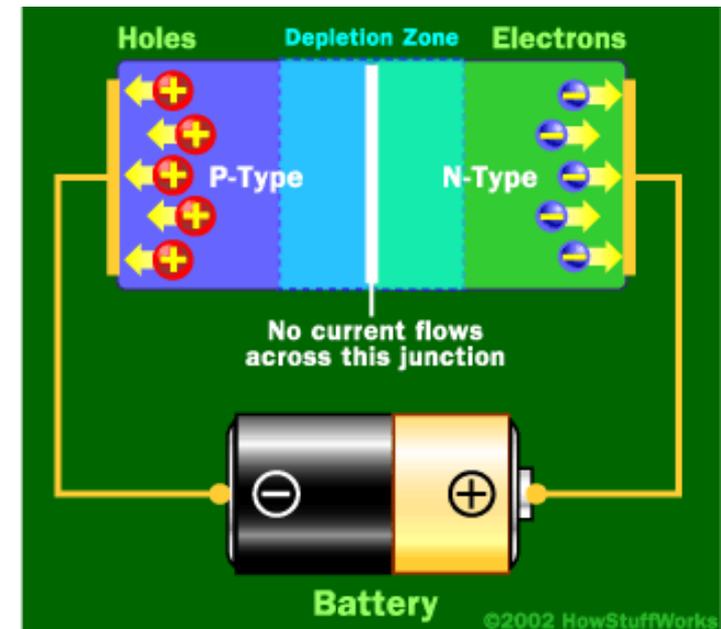
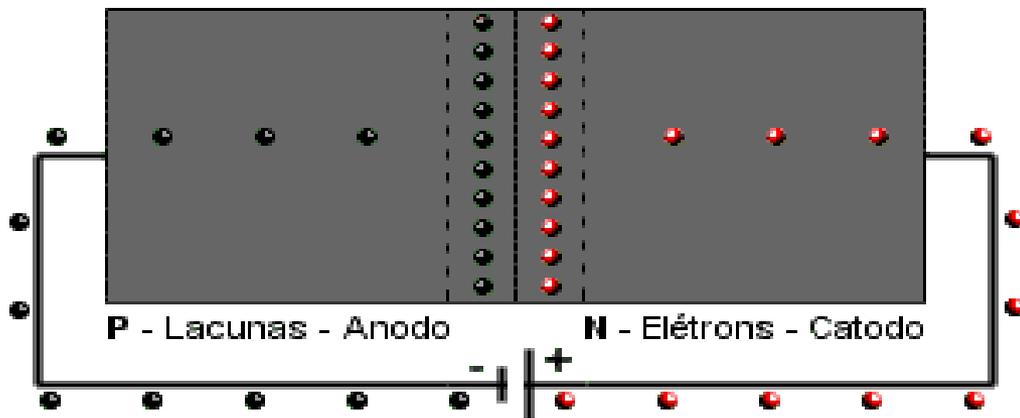
# Quando a corrente pode passar?

- É preciso mover os elétrons da área tipo-N para área tipo-P, e os buracos da área tipo-P para a tipo-N.
  - Para fazer isso, é preciso conectar o lado tipo-N do diodo a um potencial negativo e o lado tipo-P a um potencial positivo.
  - Os elétrons livres da região tipo-N serão repelidos pelo potencial negativo, e os buracos são repelidos pelo potencial positivo.
- Quando a voltagem é alta o suficiente, os elétrons da zona de depleção são arrancados e a corrente começa a circular.



# Quando a corrente não pode passar?

- Colocando uma diferença de potencial ao contrário, os elétrons da região N são atraídos pelo potencial positivo e os buracos são atraídos pelo potencial negativo.
- A zona de depleção aumenta, pois as cargas positivas e negativas estão se movendo na direção errada, e não passa corrente no circuito.

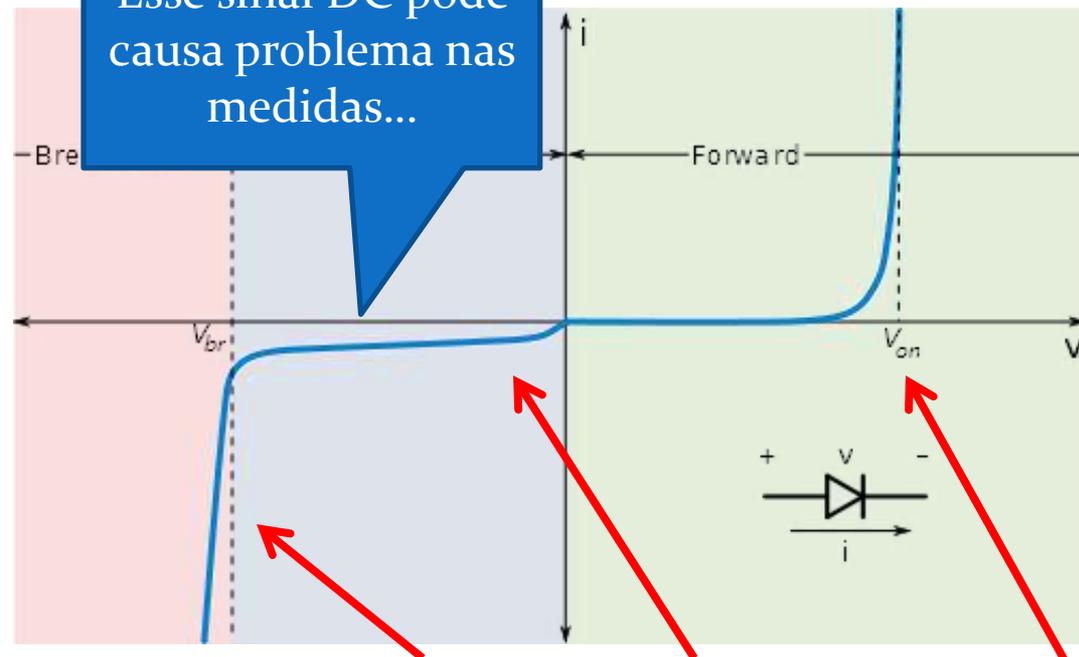


# Equação Característica

- A equação do diodo, ou a lei do diodo, é:

$$i_D(V_D) = i_{D0} \left( \exp \left[ \frac{eV_D}{kT} \right] - 1 \right)$$

Esse sinal DC pode  
causa problema nas  
medidas...



Onde:

$i_D$  e  $V_D$  são a corrente e a  
vontagem do diodo

$e$  é a carga do elétron

$i_{D0}$  é a corrente de saturação

$k=1,38 \times 10^{-23}$  J/K é a  
constante de Boltzman

$T$  é a temperatura em Kelvin

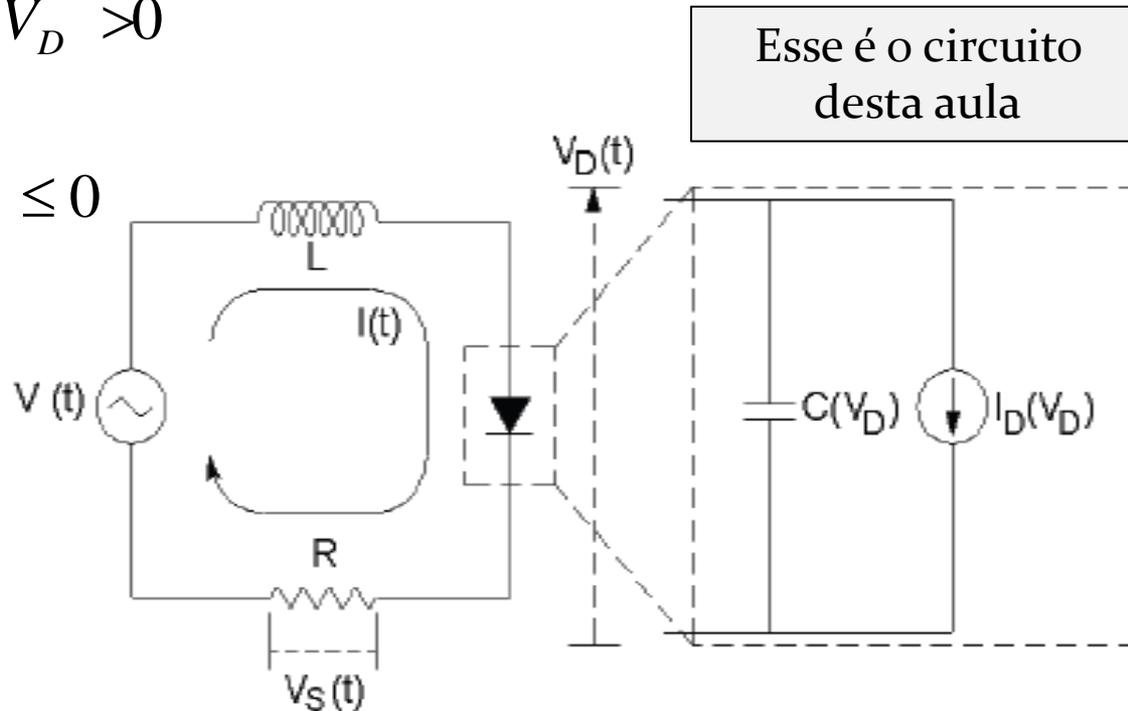
Não existem diodos ideais.

# Modelo de Diodo Real

- Devido às características da junção P-N, o diodo apresenta também uma capacitância  $C(V_D)$ , não linear, descrita por:

$$C(V_D) = C_0 \exp\left[\frac{eV_D}{kT}\right], \text{ para } V_D > 0$$

$$C(V_D) = \frac{C_0}{\sqrt{1 - \frac{eV_D}{kT}}}, \text{ para } V_D \leq 0$$



Diodo real = diodo ideal em paralelo com um capacitor cuja capacitância depende da voltagem aplicada

# Modelo de Diodo Real

- Note que a capacitância depende da tensão aplicada:

$$C(V_D) = C_0 \exp\left[\frac{eV_D}{kT}\right], \text{ para } V_D > 0$$

$$C(V_D) = \frac{C_0}{\sqrt{1 - \frac{eV_D}{kT}}}, \text{ para } V_D \leq 0$$

- Para tensões muito pequenas:

$$\frac{eV_D}{kT} \ll 1$$

a capacitância fica praticamente constante e igual a  $C_0$  e o diodo se comporta como um capacitor ideal.

- Para tensões mais elevadas, a capacitância depende fortemente da tensão sobre o diodo de uma maneira não linear

# Equação do Circuito RLD

- No RLC as equações que regiam o sistema eram:

$$\dot{q} = i$$

$$i = \frac{V_o}{L} \cos(\omega t) - \frac{R}{L} i - \frac{1}{LC} q$$

- No RLD, os termos multiplicando a corrente e a carga não são constantes, pois a capacitância e a corrente do diodo variam de maneira não linear com a voltagem:

$$\dot{q} = i$$

$$i = \frac{V_o}{L} \cos(\omega t) - \boxed{f(q)}i - \boxed{g(q)}q$$

- *O comportamento não linear está embutido nas funções  $f()$  e  $g()$ , que escrevemos de maneira genérica em termos da carga.*

# Circuito RLD

- **Resumindo:**

- ✓ Para baixas tensões o circuito **RLD** deve se comportar como um circuito **RLC** linear como o estudado em aulas anteriores.
- ✓ Para tensões suficientemente elevadas o circuito apresenta comportamento não linear podendo chegar ao caos.

- **Vamos estudar o caso em que o circuito apresenta uma resposta linear e o caso em que a resposta é não linear**

Mais sobre diodos: aula de lab3 do semestre passado e apostila de curvas características

# Montagem experimental

Monte um circuito **RLD** com:

- $R_1 = 10\Omega$
- $L = 1\text{mH}$  (indutor ideal azul)
- Diodo



Nota:

- O gerador de áudio é de outro modelo, nele a saída de baixa impedância é traseira e é essa que deve ser usada.
- Lembrem-se de medir os componentes com o multímetro.

# Tarefas 1 – para síntese

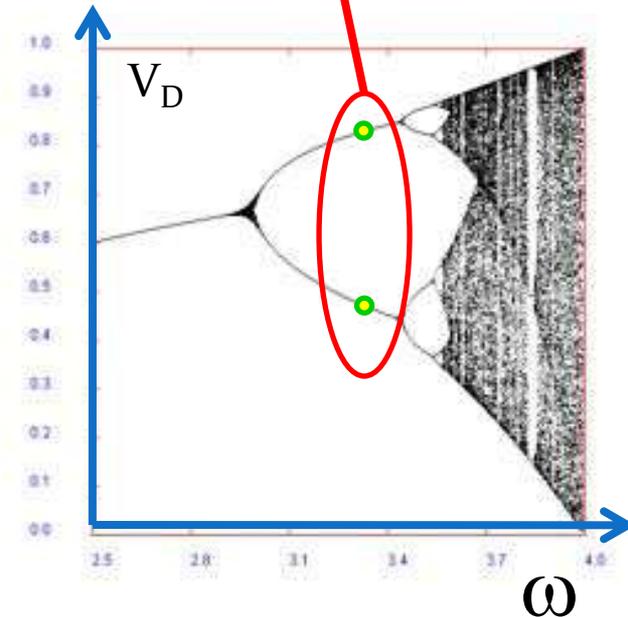
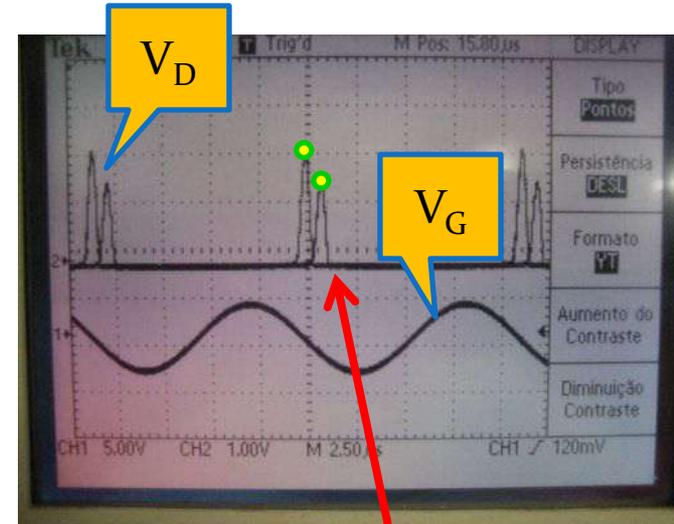
## Circuito RLD em baixa tensão:

- Comece com a amplitude de pico no gerador menor que **0.1V** e use a saída traseira de baixa impedância.
- Achar a frequência de ressonância desse circuito
  - Meça  $V_D$  e  $V_g$  enquanto faz isso... Lembre-se, precisamos de  $V_D < 0.1V$  para que apenas a parte capacitiva do diodo esteja funcionando
- A partir da frequência de ressonância determine o valor da capacitância do diodo,  $C_0$ 
  - Anote o valor da tensão usada na medida (para a discussão)
- Compare com o valor obtido por outros grupos

# Tarefas 2 – para síntese

## Circuito RLD em alta tensão

- Algo em torno de 4-5V
  - O que acontece com o diodo?
- **Construa** o diagrama de bifurcação
  - Meça com o osciloscópio a tensão no gerador,  $V_G$ , e a tensão no diodo,  $V_D$ . Comece com 40kHz e vá subindo
  - A amplitude dos picos de tensão  $V_D$  deve ser medida com o cursor. Meça vários pontos, principalmente próximo das bifurcações
  - Meça até quando for possível (3 bif. mínimo)
- Calcule a cte. de Feigenbaum
  - Compare com outros grupos e com o valor esperado teóricamente.



# Tarefas 3 – para relatório

A partir dos dados experimentais e do diagrama de bifurcação, identifique:

- Há janelas de caos? Qual seu intervalo de frequência ?
  - faça um gráfico ou tire fotos
  - depois da janela pode ver bifurcações? Comente.

# Tarefas 4 – para relatório

- Fazer o retrato de fase:  $i$  X  $di/dt$ 
  - Que modo do osciloscópio de ser usado?  $X-t$  ou  $X-Y$  ?
- Fazer o retrato de fase do circuito **RLD** para algumas frequências interessantes:
  - Quando não há bifurcação (**1** atrator para  $V_D$  do diodo)
  - Para **1** bifurcação (**2** atratores para  $V_D$  do diodo)
- Os retratos de fase são “fotos” da tela do osciloscópio
  - Devem ser mostrados, discutidos e comparados
  - Mostre todos acompanhados dos valores de tensão e corrente. Comente o que está acontecendo.

# Tarefas 5 – EXTRA

- Faça também os diagramas de fase para o circuito **RLC**, utilizando o modo **X-Y** do osciloscópio ( $C=0,47\mu\text{F}$ )
  - Na frequência de ressonância, tomando  **$q \times (dq/dt)$**  e  **$i \times (di/dt)$**
  - Mostre todos acompanhados dos valores de tensão e corrente. Comente o que está acontecendo.
  - Compare qualitativamente esses diagramas de fase com os do **RLD**.
- Faça o retrato de fase tridimensional do **RLC** e um do **RLD** para 1 bifurcação
  - Os osciloscópios permitem gravar  **$V_R$ ,  $V_D$**  (ou  **$V_C$** ) vs **tempo**.
  - Use o Origin ou outro programa para fazer um gráfico tridimensional de ( **$V_D \times V_R \times t$** )
  - Compare e comente os dois retratos de fase.

# Dicas

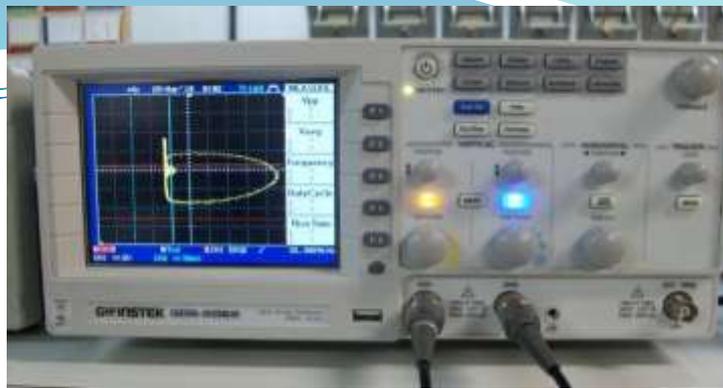
- Lembre que no caso de ressonância as tensões no capacitor (ou diodo) e no indutor podem ser muito maiores que a tensão no gerador. Então, preste atenção quando for procurar a frequência de ressonância no circuito **RLD** com tensões baixas:
  - a tensão deve ser baixa o suficiente no diodo para que a exponencial da expressão da capacitância do diodo seja desprezível.
- No caso dos diagramas de fase do **RLD** foi pedido o da corrente ( $\mathbf{V}_R$ ) pela sua derivada ( $\mathbf{V}_L$ ). Podem fazer também o diagrama de fase de carga ( $\mathbf{V}_C$ ) pela derivada da carga ( $\mathbf{V}_R$ ). **A escolha deve ser baseada na utilização do sinal de melhor qualidade.**

# Dicas

- A amplitude dos picos de tensão  $V_D$  ou  $V_L$  deve ser medida com o cursor (depois da primeira duplicação, sem o cursor é impossível medir a amplitude dos dois picos). **E congele a figura** para fazer a medida principalmente no caso de mais de 2 bifurcações, em razão da instabilidade causado por ruído.
- “Triggere” sempre pelo sinal maior e mais estável.
  - Por essa razão foi pedido que usasse  $V_G$  para as medidas do diagrama de bifurcações.

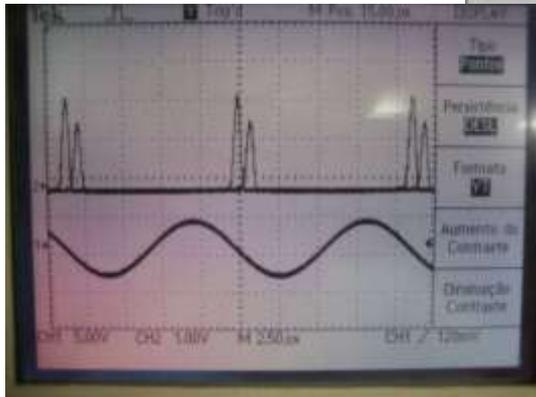
A amplitude de pico  $V_D$ , e por tanto  $V_G$ , também é um parâmetro de controle do sistema. Como queremos medir apenas a variação com  $\omega$ , mantenham  $V_G$  constante!

# Dicas



Com o botão de atenuação de frequência, o cursor fica menos sensível e é mais fácil procurar pela bifurcação

Indutor de  $1000\mu\text{H}$

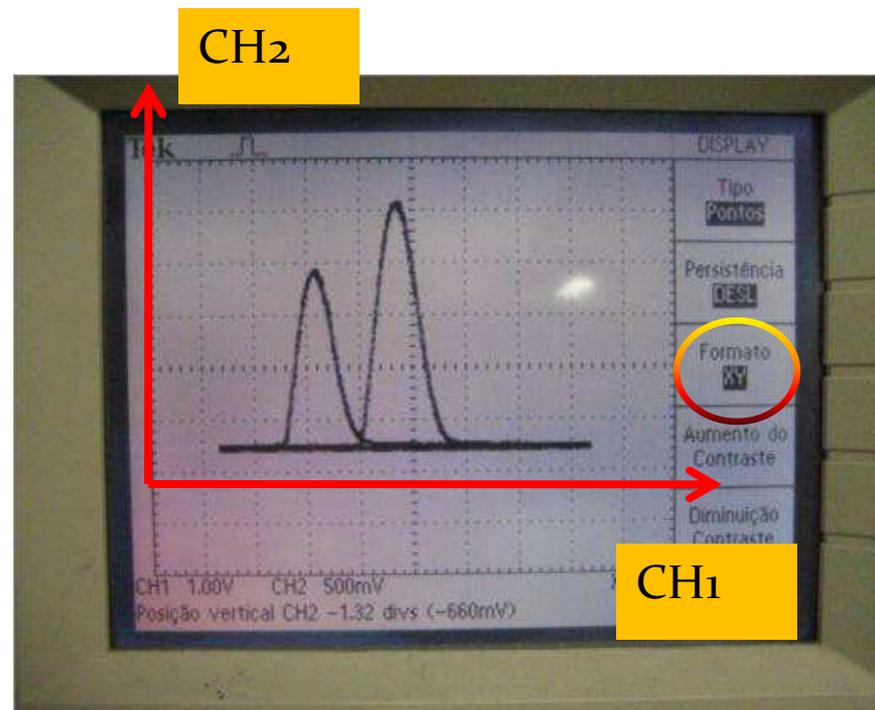
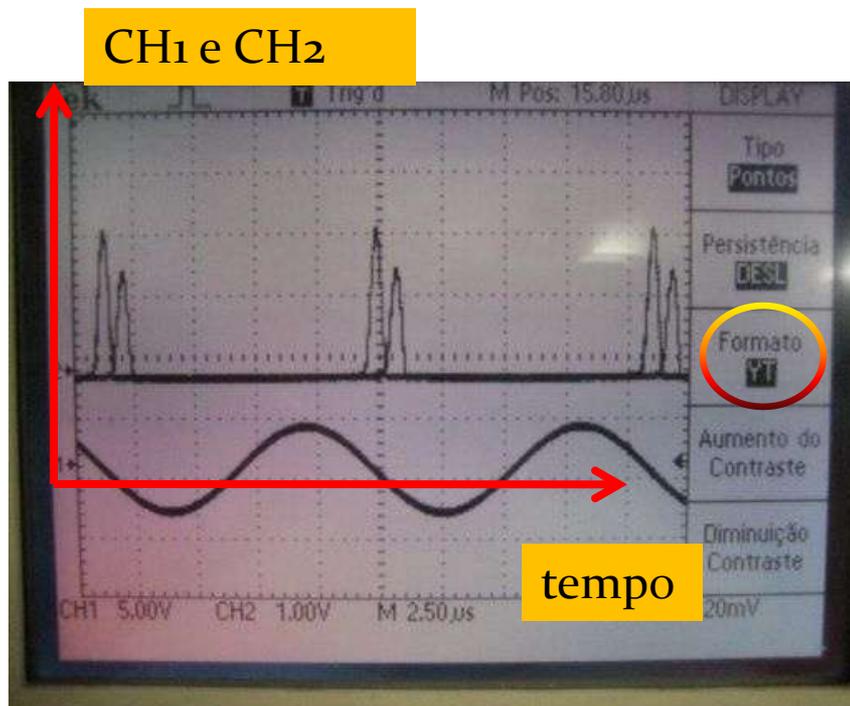


Diodo



# Mudando de X-t para X-Y

- Clique no botão display
- Selecione o formato no menu da tela



# Gráfico 3D

- No Origin...

