

# Física Experimental IV

Notas de aula: [www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

LabFlex: [www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

Profa. Eloisa Szanto  
[eloisa@dfn.if.usp.br](mailto:eloisa@dfn.if.usp.br)  
Ramal: 7111  
Pelletron

Prof. Henrique Barbosa  
[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)  
Ramal: 6647  
Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin  
[nelson.carlin@dfn.if.usp.br](mailto:nelson.carlin@dfn.if.usp.br)  
Ramal: 6820  
Pelletron

Prof. Paulo Artaxo  
[artaxo@if.usp.br](mailto:artaxo@if.usp.br)  
Ramal: 7016  
Basílio, sala 101

## Aula 6, Experiência 1 Circuitos CA e Caos

# 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

# Ressonância

	R ( $\Omega$ )	L (mH)	Wdiodo (Mrad/s)	Fdiodo (khz)	VD (mV)	C ( $10^{-12}$ F)
H01	9.8 (6)	1.114 (48)		440 (20)	508 (4)	117 (6)
H02	9.8 (6)	1.12 (30)		343 (1)	98 (2)	190 (50)
H03	11.10 (14)	1.065 (27)	2.08945 (15)		??	210 (16)
H04	??	??			??	240 (13)
H05	??	1.01 (6)	2.51 (3)		489 (4)	159 (10)
H06	10.9 (4)	1.13 (6)	2.604 (22)		87 (7)	131 (7)
H07	9.9 (1)	1.10 (23)	2.262 (28)	360 (4)	346 (9)	177 (30)
H08	??	??		320.4 (16)	673.6 (93)	219 (1)
H09	10.5 (2)	1.048 (6)	??	??	??	261 (5)

Não foi possível medir em tensões menores devido a problemas no sinal. Usando os valores aproximados  $k \simeq 1.38 \times 10^{-23}$ ,  $T \simeq 300$ ,  $e \simeq 1.6 \times 10^{-19}$ , em unidades do SI, temos

$$\frac{eV_D}{kT} \simeq 19.2$$

# 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:

$$\frac{eV_D}{kT} \ll 1 \Rightarrow C(V_D) \rightarrow C_0$$

VD (mV)	eVd/kT 300K	exp()
400	15.5	5172864
100	3.86	47
50	1.93	6.9
10	0.386	1.5

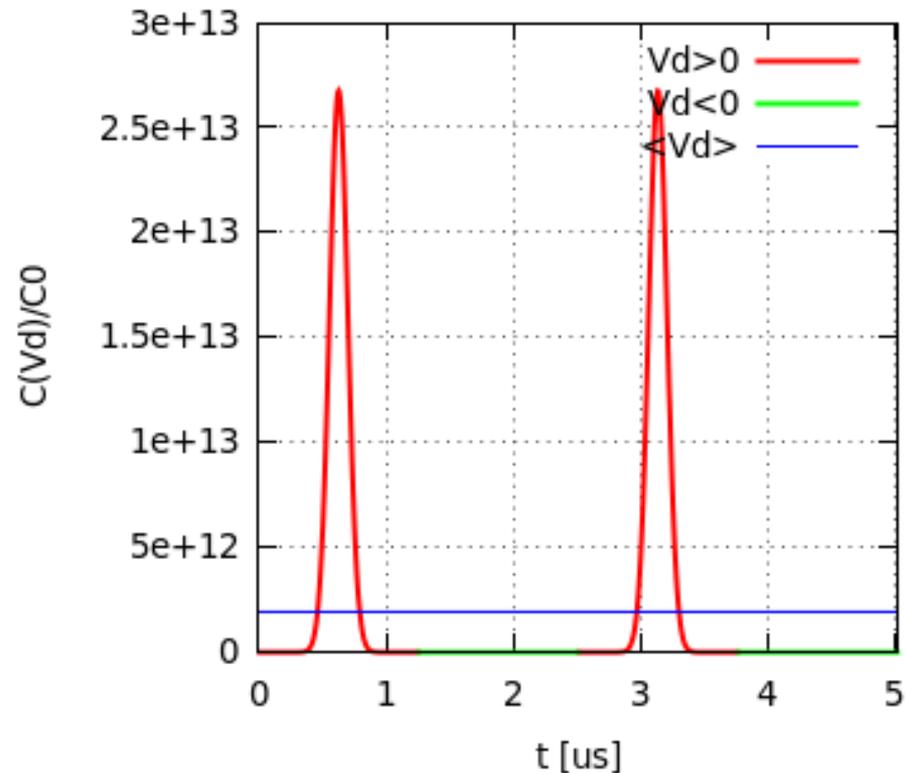
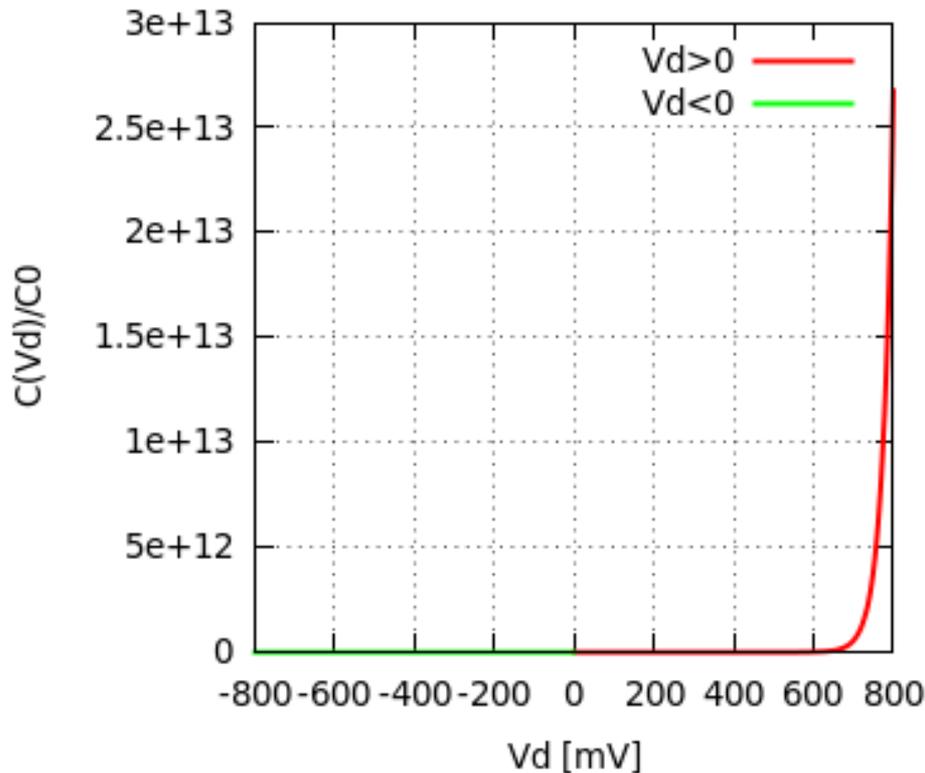
# RLD $T=300\text{K}$ , $\omega_0=2.5\text{krad/s}$ , $T=2.5\mu\text{s}$

- Com  **$V_D=800\text{mV}$** , o regime é totalmente não linear. O valor experimental é a média, sobre um ciclo da tensão alternada,

$$C_{\text{exp}} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T C[V_D \cos(\omega t)] dt$$

800mV

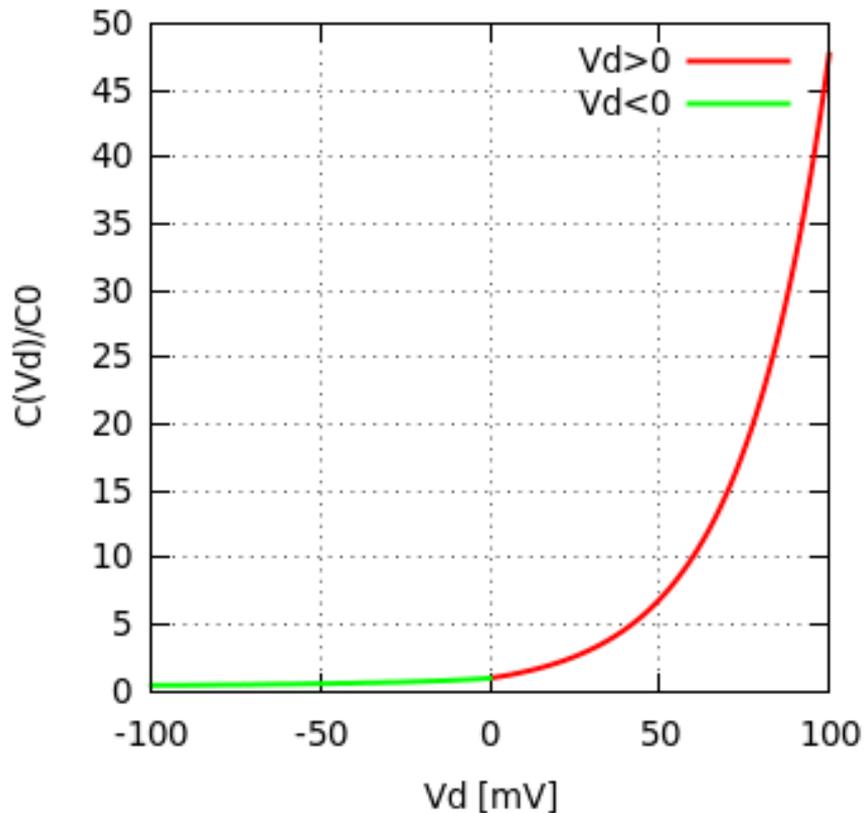
800mV



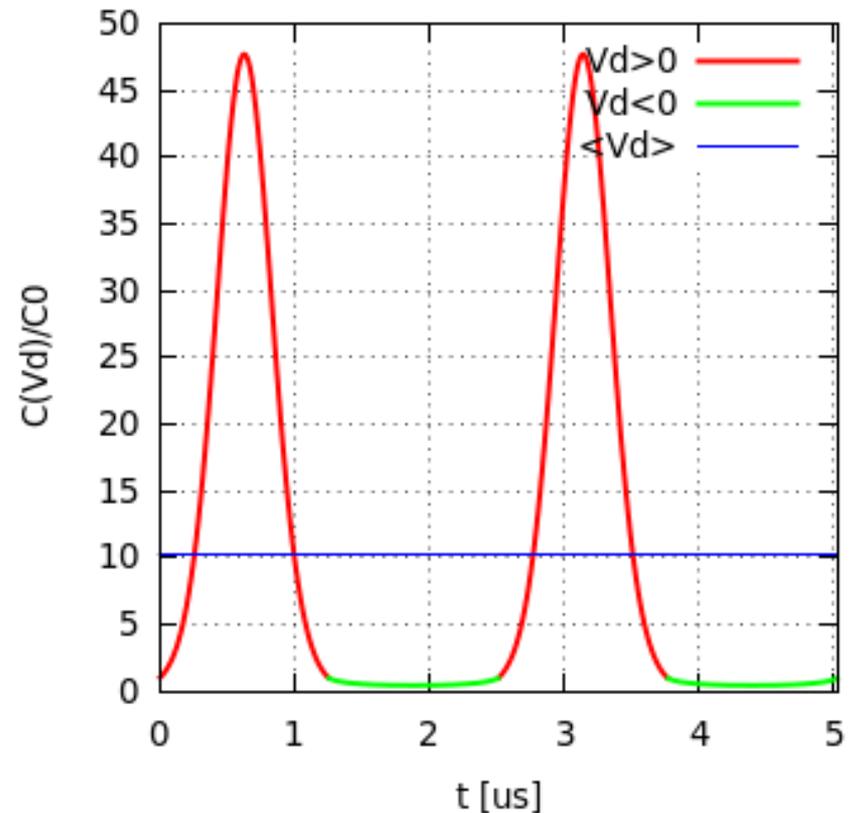
# RLD $T=300\text{K}$ , $\omega_0=2.5\text{krad/s}$ , $T=2.5\mu\text{s}$

- Com  $V_D=100\text{mV}$ , o efeito ainda é muito forte e o valor médio de  $C(V_D)$  em um ciclo é  $10 \cdot C_0$

100mV

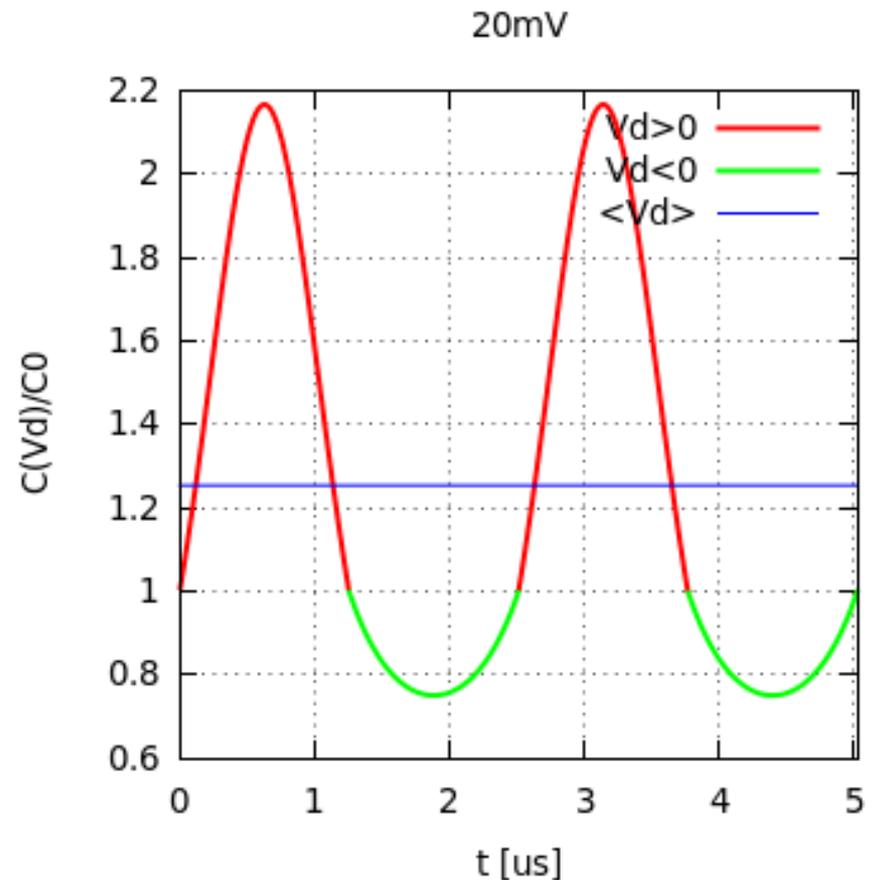
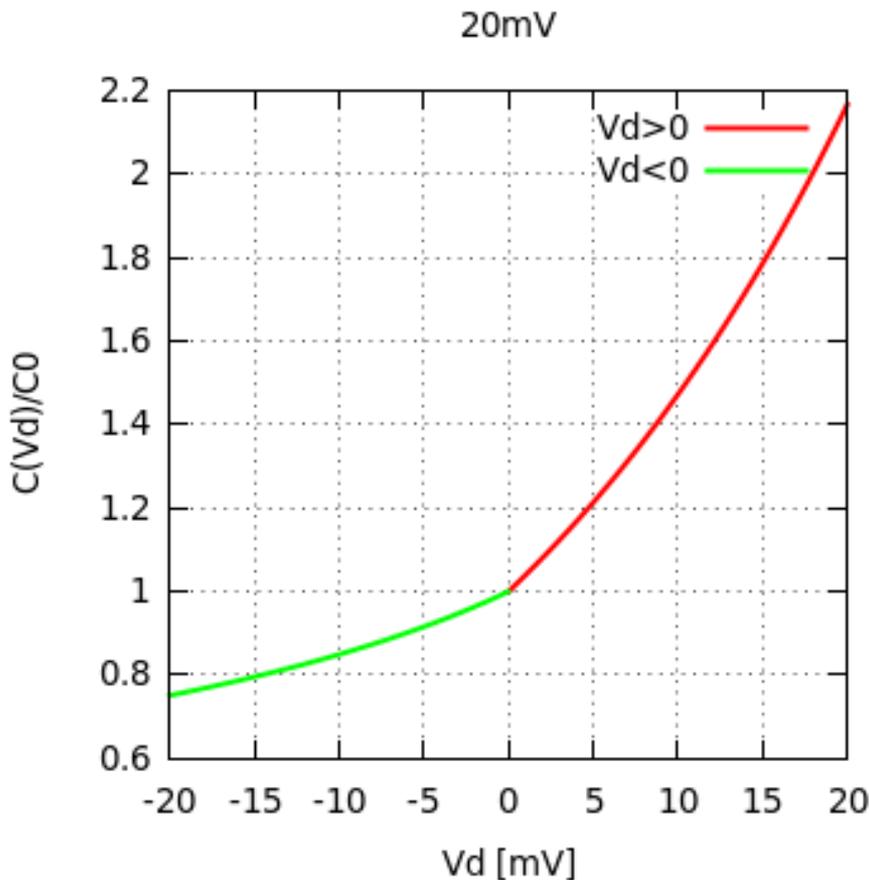


100mV



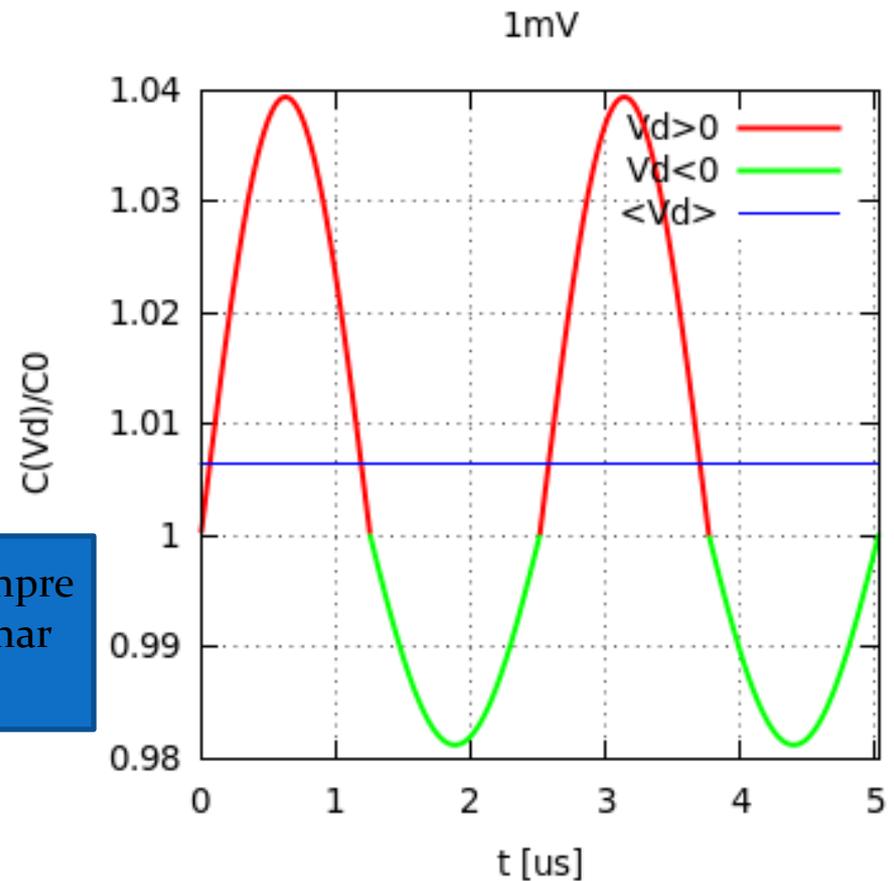
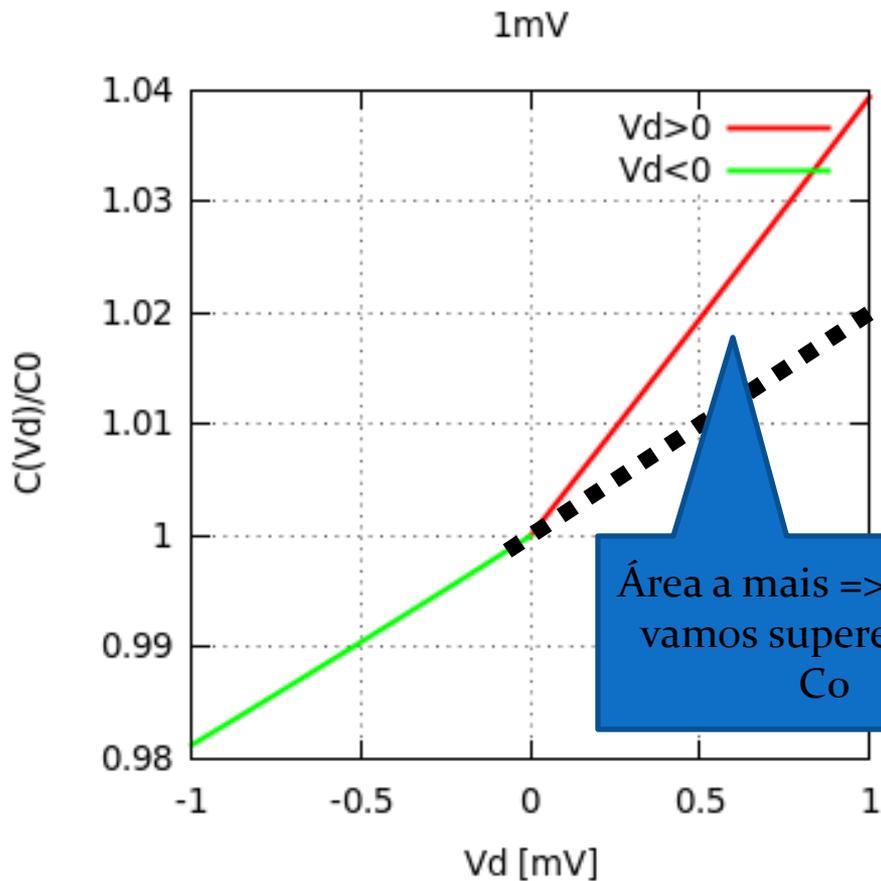
# RLD $T=300\text{K}$ , $\omega_0=2.5\text{krad/s}$ , $T=2.5\mu\text{s}$

- Com  $V_D=20\text{mV}$ , a capacitância oscila quase como uma senoide. Os máximos ainda são mais altos que os mínimos e o valor médio de  $C(V_D)$  em um ciclo é  $1.25 \cdot C_0$



# RLD $T=300\text{K}$ , $\omega_0=2.5\text{krad/s}$ , $T=2.5\mu\text{s}$

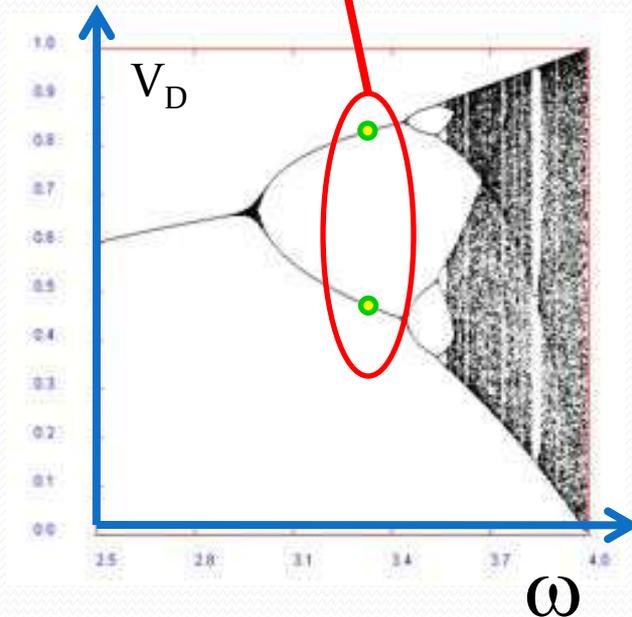
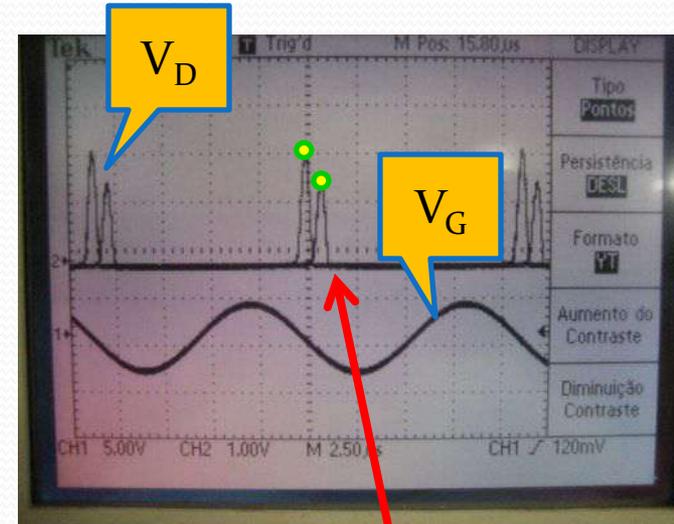
- Mesmo para  $V_D=1\text{mV}$ , o regime ainda não é totalmente não linear. De fato, só teremos  $C_0$  quando  $V_D=0$  devido a descontinuidade da derivada.



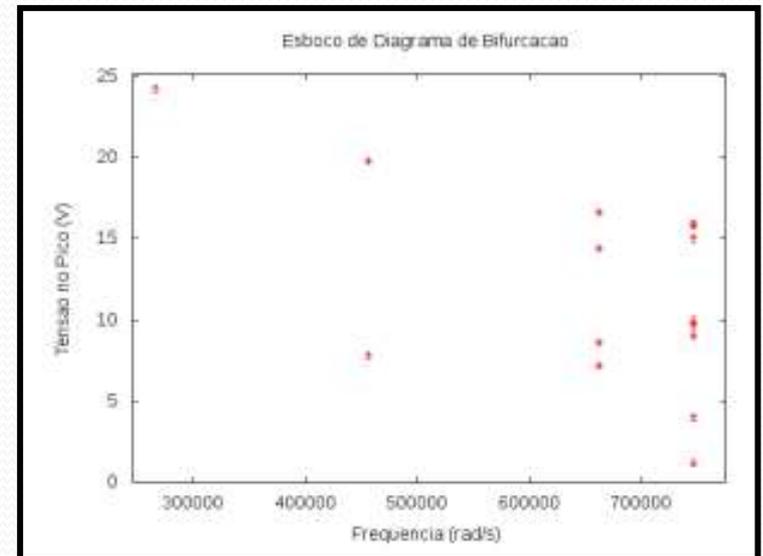
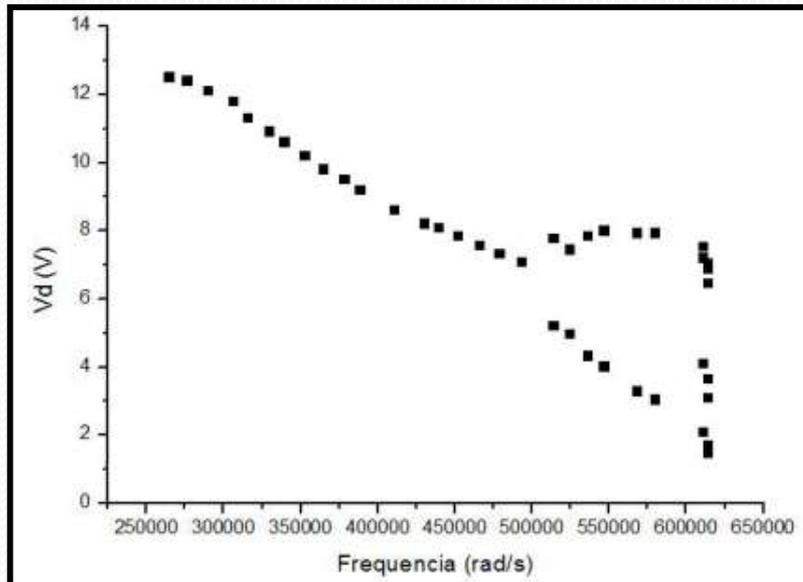
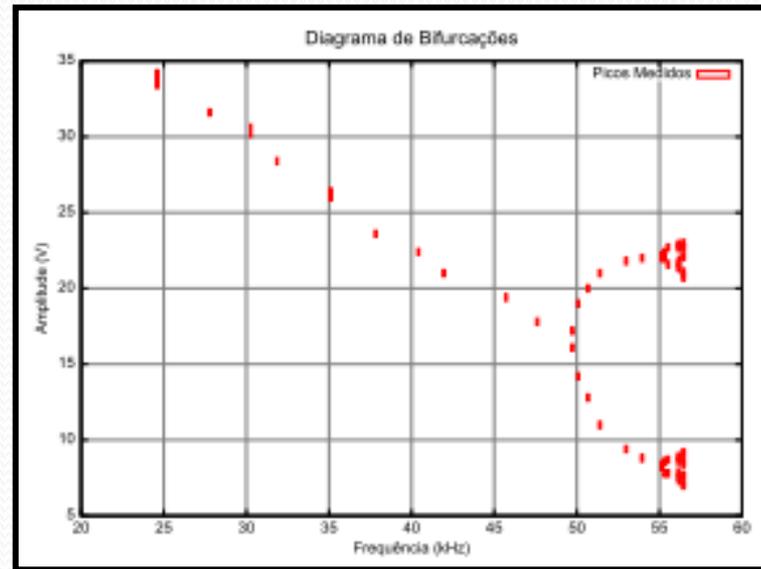
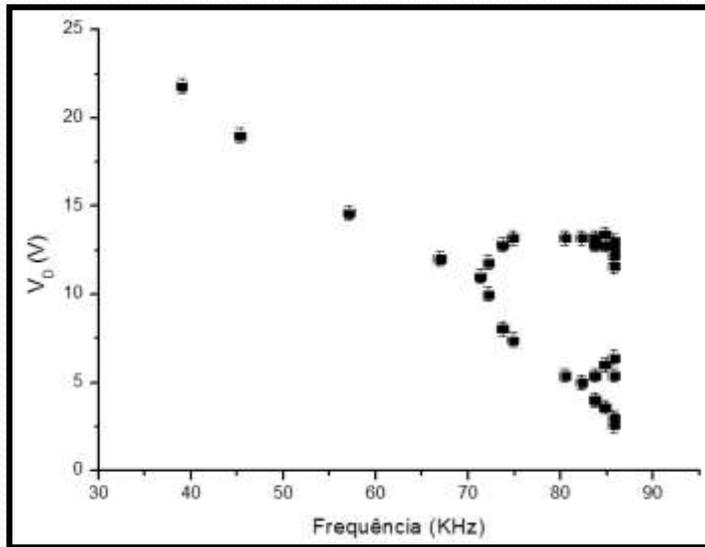
# Tarefas 2 – para síntese

## Circuito RLD em alta tensão

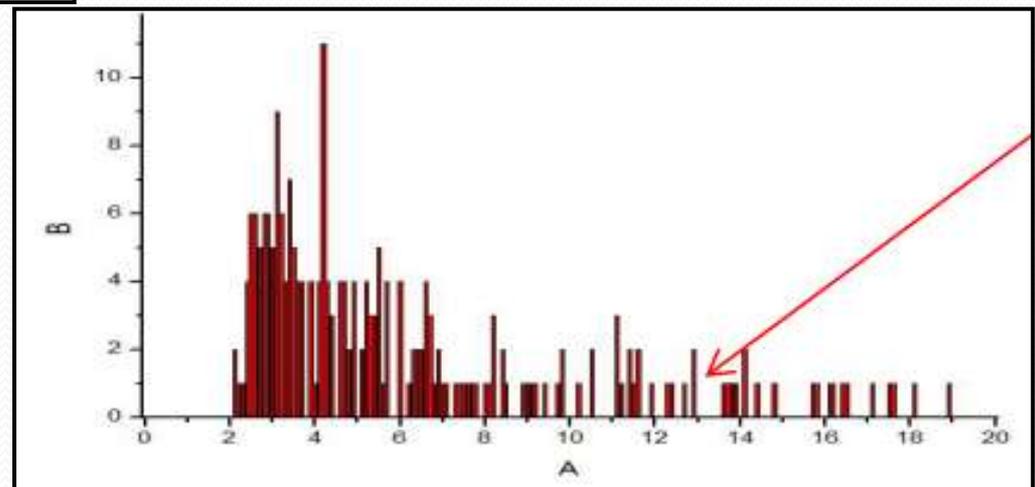
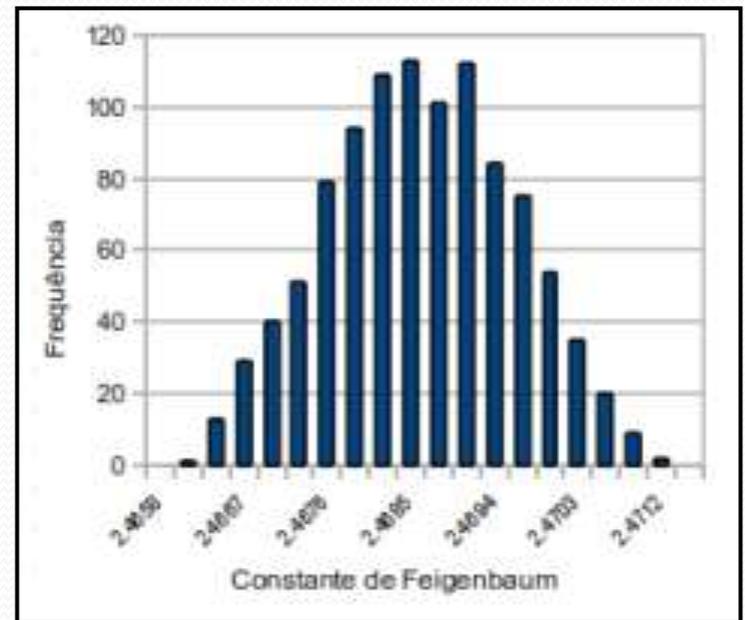
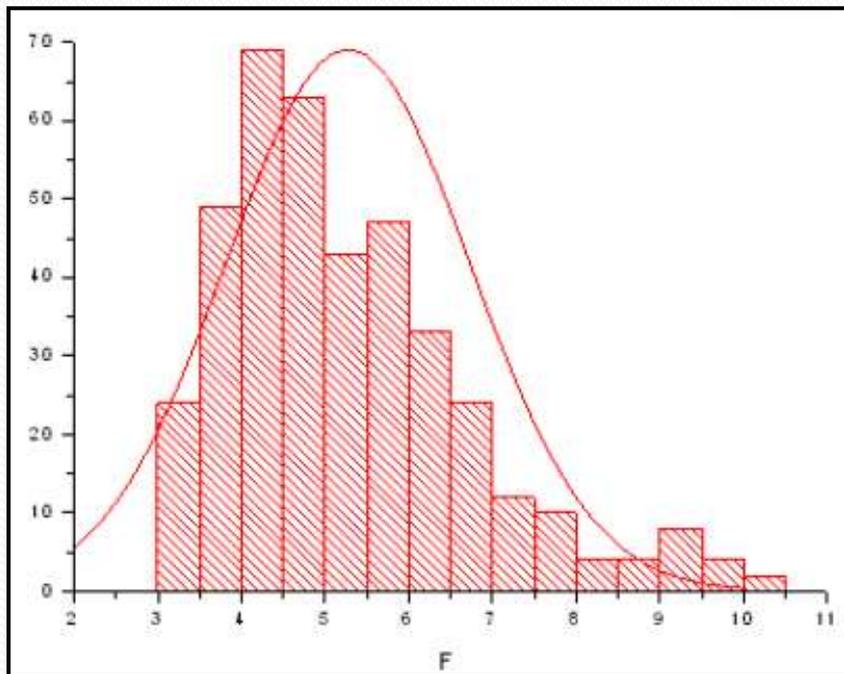
- Algo em torno de 4-5V
  - O que acontece com o diodo?
- **Construa** o diagrama de bifurcação
  - Meça com o osciloscópio a tensão no gerador,  $V_G$ , e a tensão no diodo,  $V_D$ . Comece com 40kHz e vá subindo
  - A amplitude dos picos de tensão  $V_D$  deve ser medida com o cursor. Meça vários pontos, 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.



# Diagrama de bifurcação

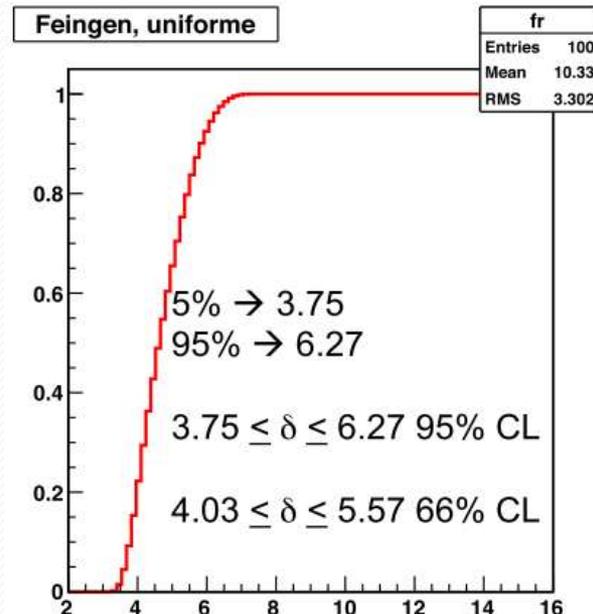
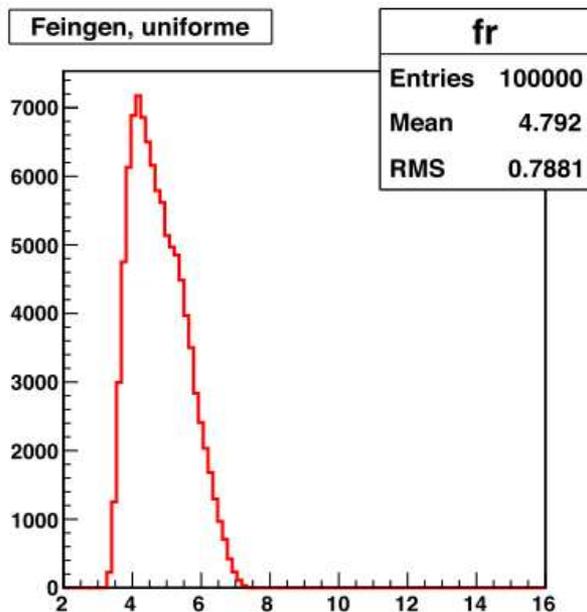


# Monte Carlo



# Integral PDF

- A incerteza sai da distribuição de probabilidades.
- Se não tem uma forma conhecida, o melhor é dar valores característicos: mediana (50%) +95% -5%, por exemplo
- Ou momentos de mais alta ordem: kurtosis, etc....



RMS seria o CL 66%:

$4.78 \pm 0.79$  (rms)

Dar explicitamente o intervalo de confiança:

$4.8^{+1.5}_{-1.0}$  (95% CL)

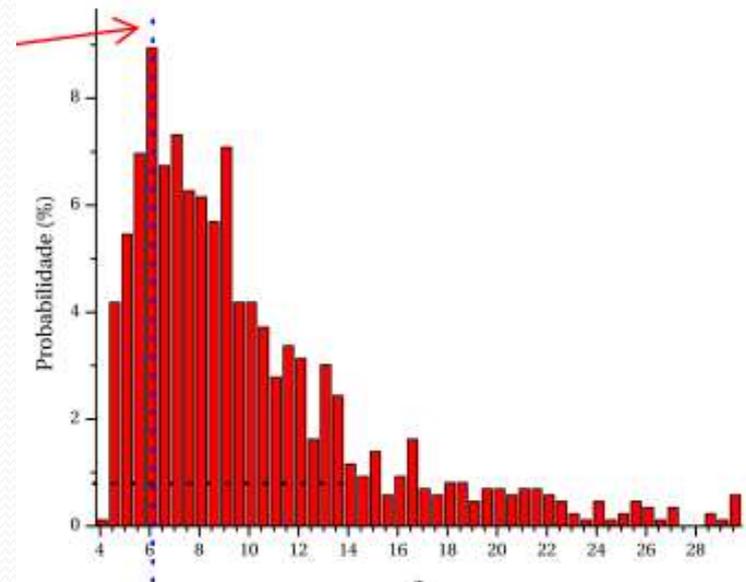
# Feigenbaum 4.67...

	"Médio"	95%	5%
H01	5.27	<b>+3.00</b>	-0.52
H02	5.58	+0.50	-0.42
H03	2.4685	<b>+0.0015</b>	<b>-0.0008</b>
H04	4.1	<b>8</b>	
H05	3.62	<b>+32</b>	<b>-28</b>
H06	4.0	+0.6	-0.5
H07	3.34	+0.6	-0.5
H08	5.3	<b>+3.8</b>	<b>-2.2</b>
H09	6.03	<b>+8</b>	<b>-2</b>

Que valor informar como a média?

Alguns grupos usaram o valor mais provável... Mas isso faz sentido com o número de simulações realizados?

Melhor usar a mediana (50%)....



# Tarefas 3 – para relatório

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

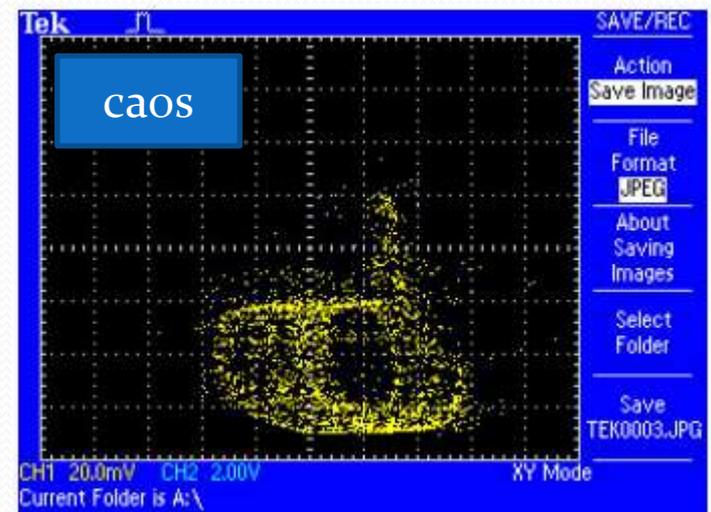
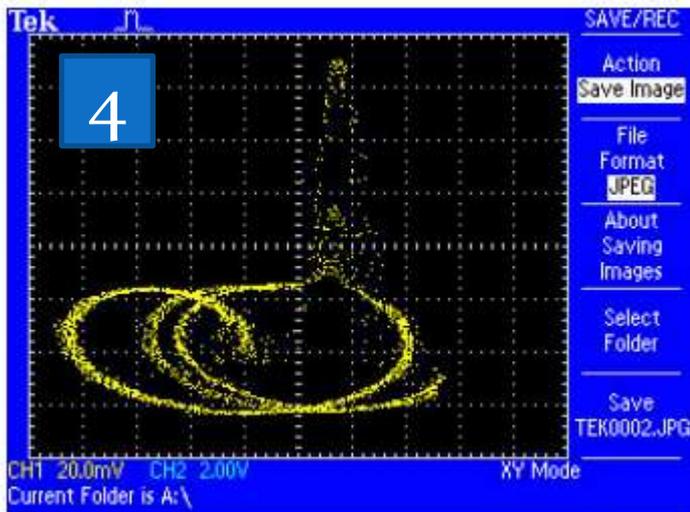
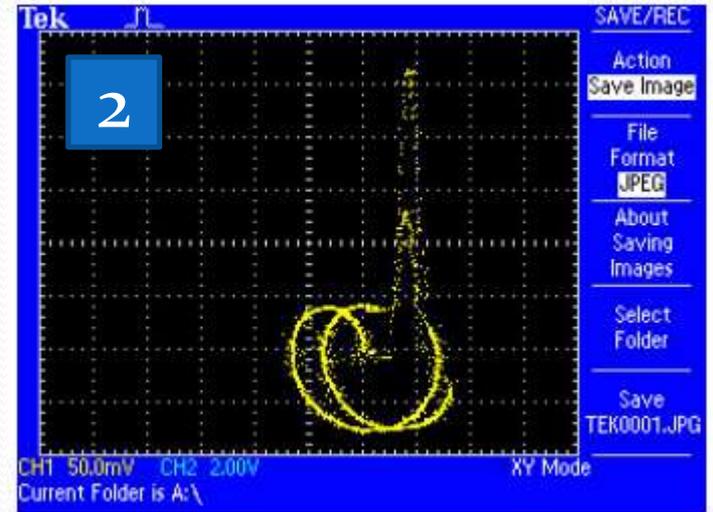
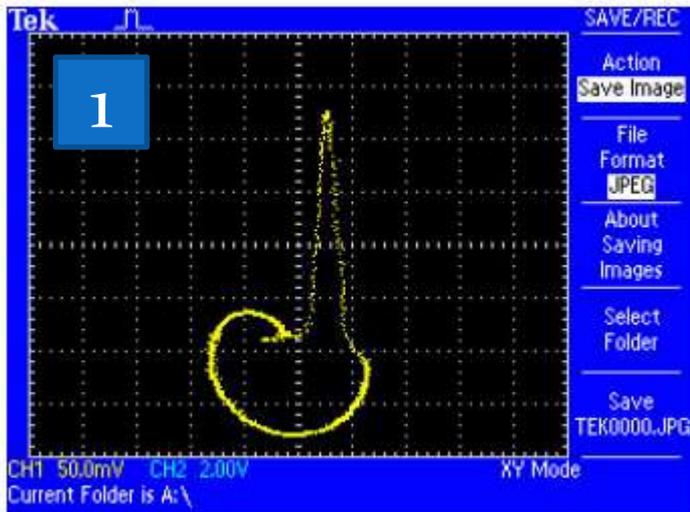
- Há janelas de caos? Qual seu intervalo de frequência ?
  - faça um gráfico ou tire fotos
  - depois da janela pode ver bifurcações? Comente.

Janela de caos: intervalo de frequência entre as quais o sistema apresenta caos (não há atratores).

# Tarefas 4 – para relatório

- Fazer o retrato de fase:  $i \times di/dt$ 
  - 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)
  - Para **2** bifurcações (**4** atratores para  $V_D$  do diodo)
  - Quando o circuito está em regime caótico
- 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.

# Retratos de fase



# 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.

# Retratos de Fase – H07

