

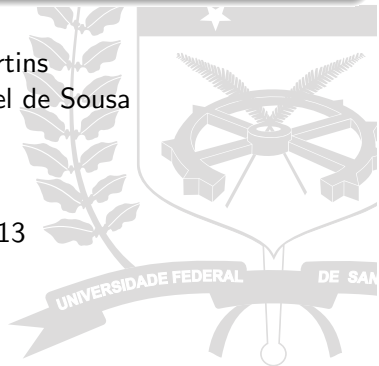


# Sensor de Temperatura Alimentado por RF

Gustavo Campos Martins  
Orientador: Fernando Rangel de Sousa

GRF, UFSC

12 de agosto de 2013



# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Definição do Sistema
- 3 Projeto
- 4 Validação por Simulação e Resultados Experimentais Parciais
- 5 Conclusão

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Definição do Sistema
- 3 Projeto
- 4 Validação por Simulação e Resultados Experimentais Parciais
- 5 Conclusão

# Introdução

- Trabalhos de pesquisa do grupo são no contexto de WBANs
- Redes de sensores instaladas no corpo humano:
  - Baixo consumo
  - Dispositivos pequenos
  - Transmissão em distâncias de poucos metros



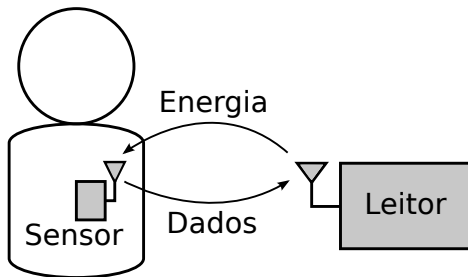
# Introdução

- Monitoramento contínuo de pacientes
- Permite prever complicações no quadro do paciente
- Dispositivos sem fios e sem bateria



# Introdução

- Métodos de captação de energia de fontes alternativas:
  - diferenças de temperatura, vibrações, diferenças de pH, ondas eletromagnéticas, ...



- Dispositivo leitor: envia energia e recebe dados do sensor
- Dispositivo sensor: recebe energia e envia dados de medição

# Introdução

- Desenvolvido neste trabalho:
  - Sensor alimentado por RF
    - Não possui bateria
    - Potência não pode exceder valores padronizados, a fim de diminuir riscos para o paciente
  - Sensor de temperatura CMOS que mede temperaturas de 35 a 42 °C
  - Completamente integrado
    - Dispositivo com tamanho reduzido
  - Instalado sobre a pele

# Sumário

1 Introdução

**2 Definição do Sistema**

3 Projeto

4 Validação por Simulação e Resultados Experimentais Parciais

5 Conclusão



# Revisão Bibliográfica

Referência	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Tecnologia (nm)	250	130	130	130	180
Frequência (MHz)	450	900	900	868	910
Área (mm <sup>2</sup> )	1,2	-	0,95	3,96	1,2
Cons. <i>standby</i> ( $\mu$ W)	5	6	-	$\approx 0,11$	-
Cons. ativo ( $\mu$ W)	1500	9	7,9	-	7
Eficiência RF-DC (%)	-	30	7,6	35	-
$P_{av,min}$ (dBm)	-12,5	-12	-10,3	-	-5

[1] KOCER, F.; FLYNN, M. *An rf-powered, wireless cmos temperature sensor*. **Sensors Journal, IEEE, 2006.**

[2] YEAGER, D. et al. *A 9  $\mu$ A, Addressable Gen2 Sensor Tag for Bio-signal Acquisition*. **Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2010.**

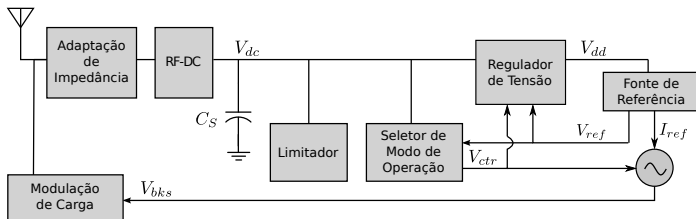
[3] REINISCH, H. et al. *A multifrequency passive sensing tag with on-chip temperature sensor and off-chip sensor interface using epc hf and uhf rfid technology*. **Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2011.**

[4] VAZ, A. et al. *Full passive uhf tag with a temperature sensor suitable for human body temperature monitoring*. **Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on, 2010.**

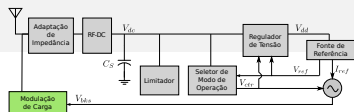
[5] QIAN, J. et al. *A passive UHF tag for RFID-based train axle temperature measurement system*. In: **Custom Integrated Circuits Conference (CICC), 2011 IEEE, 2011.**

# Sistema

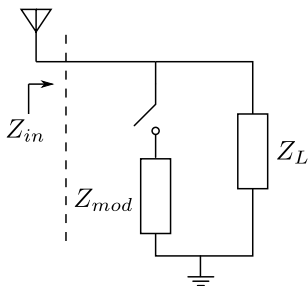
- Frequência do sinal de entrada: 900 MHz
- Tecnologia: IBM 130 nm



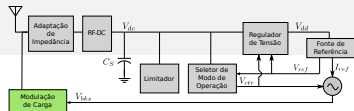
# Modulação de Carga



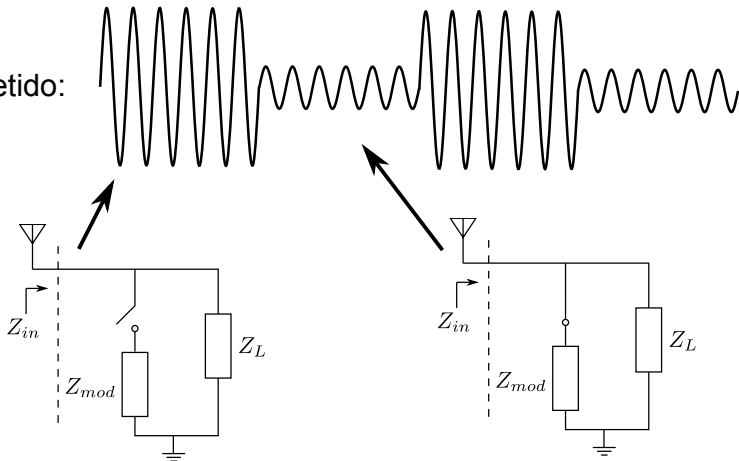
- Também conhecido como LSK (*Load Shift Keying*)
- Modula o coeficiente de reflexão/amplitude e fase do sinal refletido



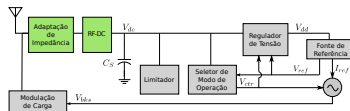
# Modulação de Carga



Sinal Refletido:



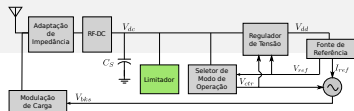
# Retificador e Adaptação de Impedância



- Adaptação de Impedância: maior transferência de potência
- Retificador: Converte entrada AC em DC
- Capacitor  $C_S$  garante autonomia do dispositivo
- Definição de eficiência do retificador:

$$PCE = \frac{P_{dc}}{P_{av}}$$

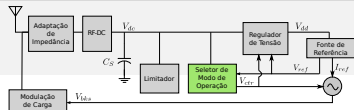
# Limitador de Tensão



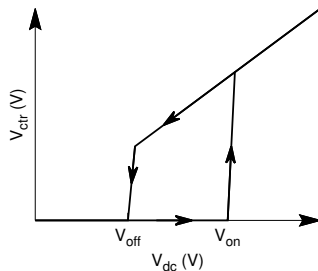
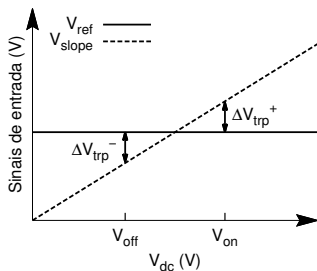
- Limita a saída do retificador em 1,6 V



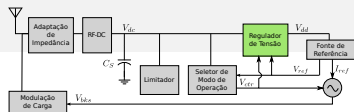
# Seletor de Modo de Operação



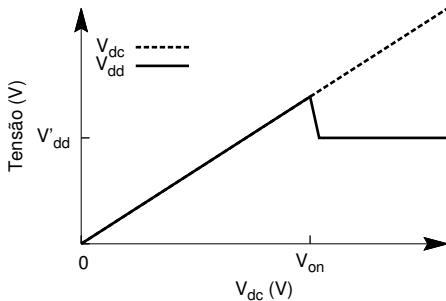
- Inicia o sistema somente quando  $V_{dc}$  é alto o suficiente
- Permite menor consumo quando  $V_{dc}$  é baixo
- Influencia na autonomia:  $I_L = C_S \Delta V_{on-off} / \Delta t$



# Regulador de Tensão

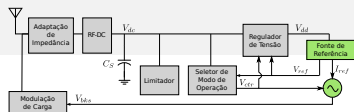


- Variação da tensão de alimentação causa erros na medição de temperatura





# Sensor de Temperatura



- Formado pelos circuitos da fonte de referência e do oscilador
- A frequência do oscilador depende da corrente de referência
- Coeficiente de temperatura:

$$TC_I = \left. \frac{1}{I_{ref}} \frac{\partial I_{ref}}{\partial T} \right|_{T=T_0}, TC_f = \left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} \right|_{T=T_0}$$

- Sensibilidade à alimentação:

$$PSS_I = \left. \frac{1}{I_{ref}} \frac{\partial I_{ref}}{\partial V_{dd}} \right|_{V_{dd}=V_{dd0}}, PSS_f = \left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial V_{dd}} \right|_{V_{dd}=V_{dd0}}$$

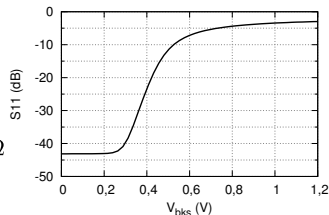
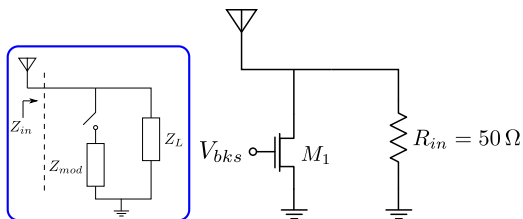
- Calibração para obter erro de medição  $< 0,2^\circ\text{C}$

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Definição do Sistema
- 3 Projeto**
- 4 Validação por Simulação e Resultados Experimentais Parciais
- 5 Conclusão

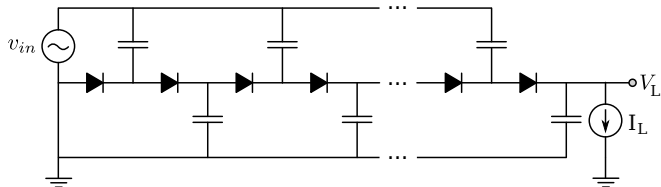
# Modulação de Carga

- Considerando o dispositivo leitor apresentado em [1]:
  - Mínimo  $P_{av}$  escolhido =  $-10$  dBm



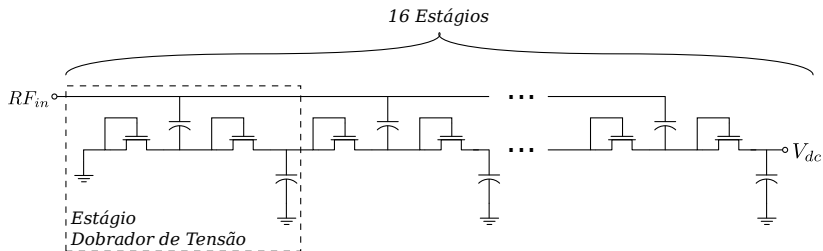
[1] MAYORDOMO, I. et al. *Design and implementation of a long-range rfid reader for passive transponders*. **Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on**, v. 57, n. 5, p. 1283–1290, 2009.

# Retificador



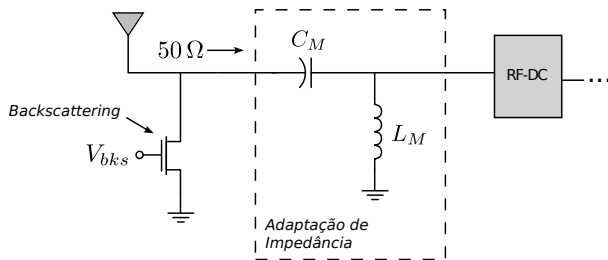
- Baseado no dobrador de tensão Greinacher
- Permite sinais de entrada com amplitudes baixas

# Retificador



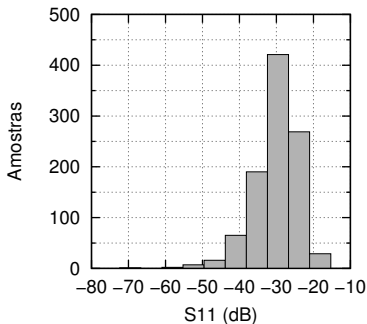
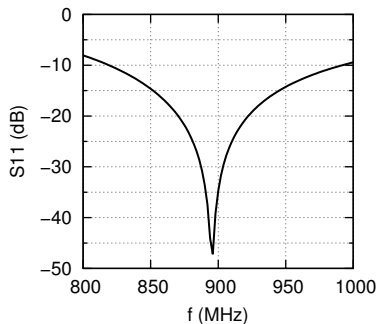
- Transistores nativos em configuração diodo
- Retificador otimizado para  $V_{dc} = 1\text{ V}$  e  $I_L = 10\ \mu\text{A}$ 
  - $w$  e  $L$  dos transistores, capacitores e o número de estágios do retificador

# Adaptação de Impedância - Esquemático



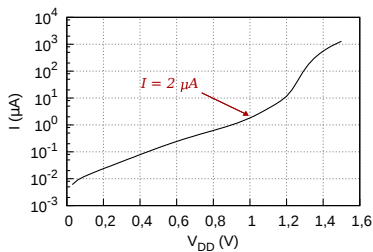
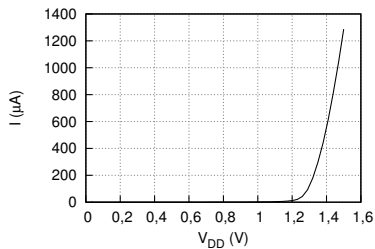
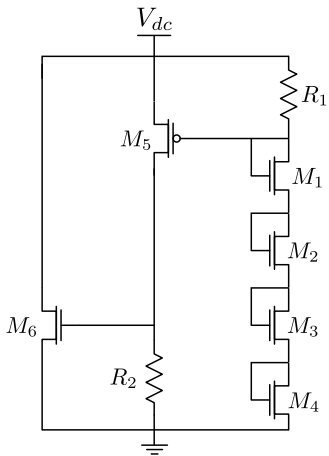
- A rede foi projetada considerando parasitas do *layout*

# Adaptação de Impedância e Retificador - Simulação



- Pior caso na simulação Monte Carlo:  $S_{11} = -15$  dB
- PCE = 10%

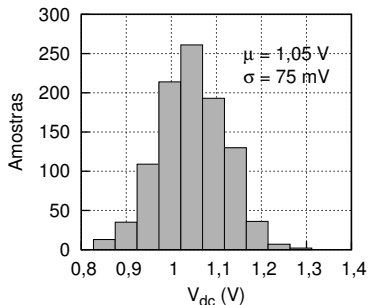
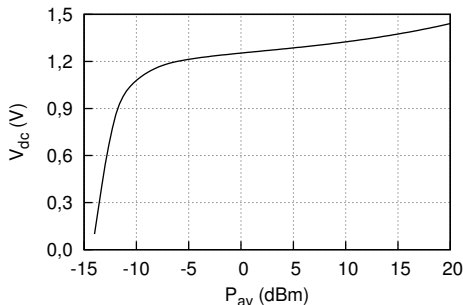
# Limitador de Tensão



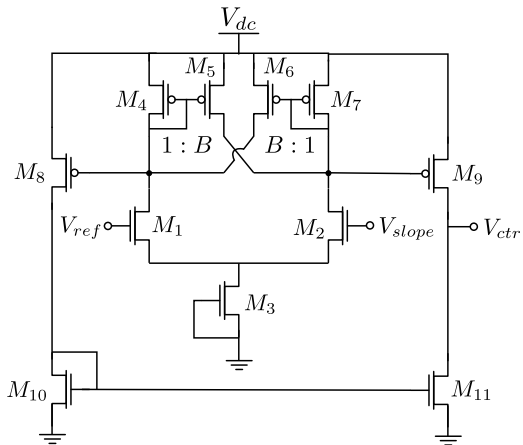


# Limitador de Tensão - Simulação

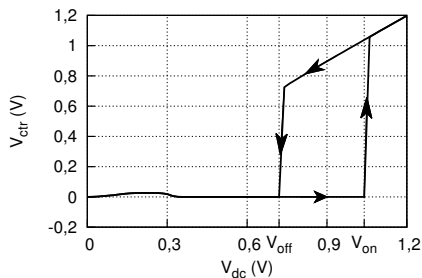
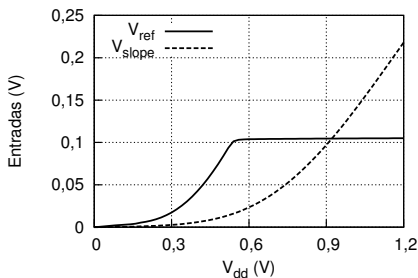
- Simulação com saída do retificador ligada ao limitador
- Monte Carlo:  $P_{av} = -10$  dBm e 1000 amostras



# Seletor de Modo de Operação - Esquemático

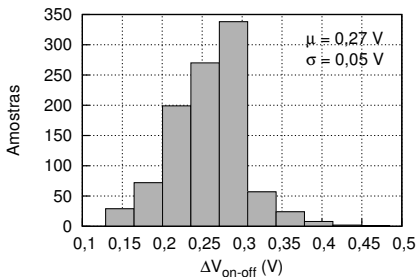
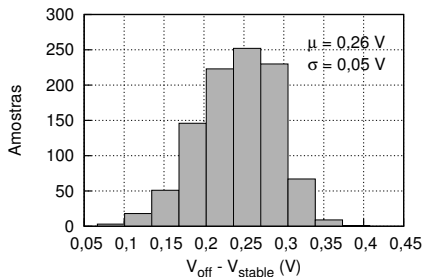


# Seletor de Modo de Operação - Simulação



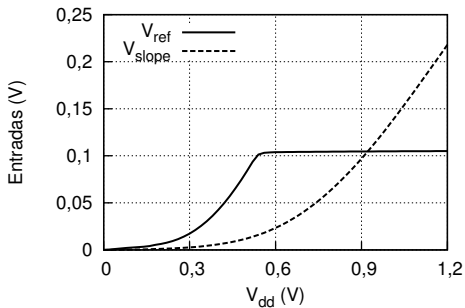
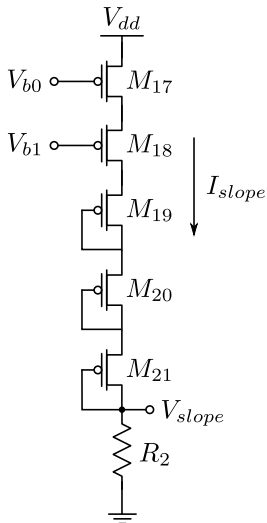
- O projeto desse bloco depende dos resultados da fonte de referência
- Foi obtido  $V_{stable} \simeq 0,6$  V e escolhido  $V_{off} = 0,75$  V e  $V_{on} = 1,05$  V
- Consumo desse circuito é 34 nA

# Seletor de Modo de Operação - Monte Carlo

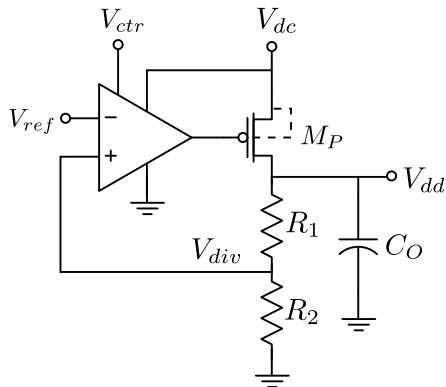


- $V_{off} - V_{stable}$  deve ser sempre positivo
- $\Delta V_{on-off}$  influencia no tamanho de  $C_S$

# Gerador da Tensão de Rampa

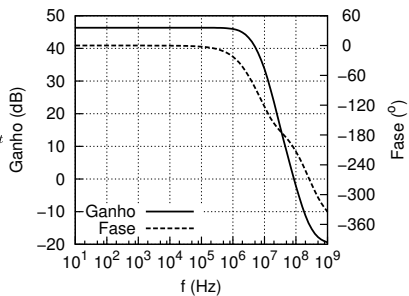
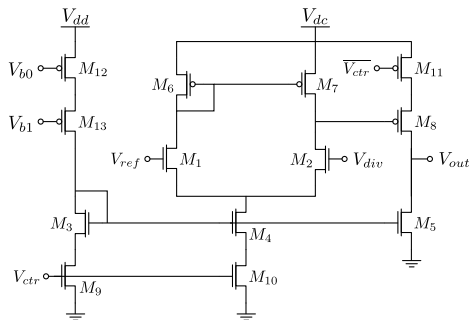


# Regulador de Tensão - *Low-Dropout Regulator*

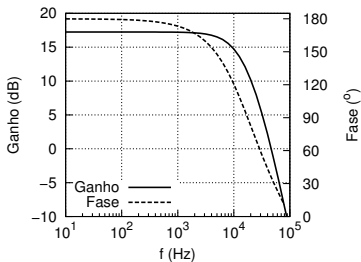
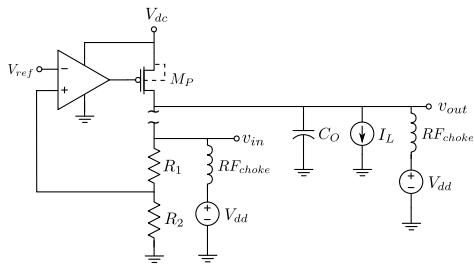


- Vantagem: possibilita baixa diferença entre tensão de entrada e saída
- $V_{ref}$  é gerado pelo circuito da fonte de referência

# Regulador de Tensão - AmpOp



# Regulador de Tensão - Estabilidade



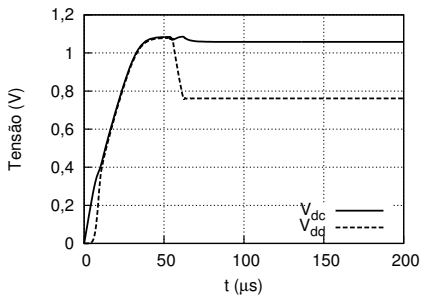
- $PM = 36^\circ$

- Consumo total =  $2,5 \mu A$

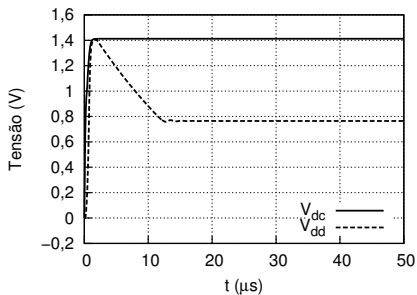


# Regulador de Tensão - Transiente

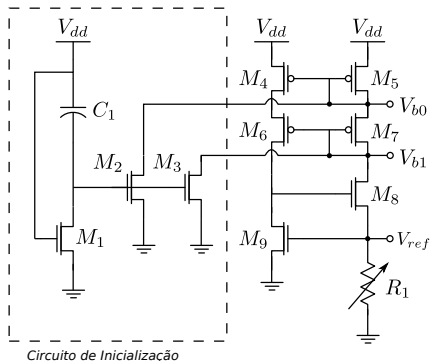
$$I_{dc} = 10 \mu\text{A}$$



$$I_{dc} = 1 \text{ mA}$$



# Fonte de Referência - Esquemático



$$I_{ref} \simeq \frac{V_{t9}}{R_1}$$

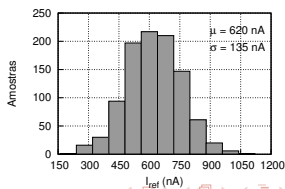
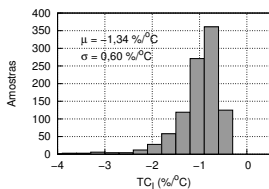
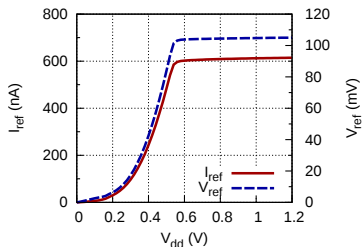
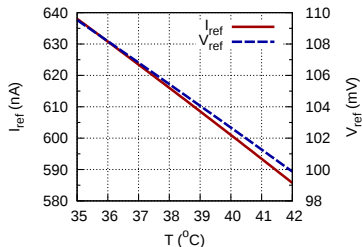
$$TC_I \simeq \frac{1}{V_{t9}} \frac{\partial V_{t9}}{\partial T} - \frac{1}{R_1} \frac{\partial R_1}{\partial T} = TC_{V_{t9}} - TC_{R_1}$$

# Fonte de Referência - Saídas

Valores nominais:

$$I_{ref} = 613 \text{ nA}$$

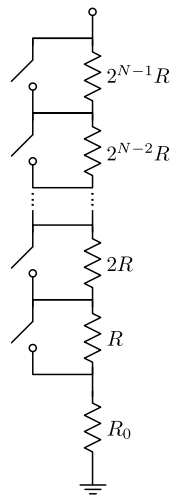
$$TC_I = -1,22 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$$



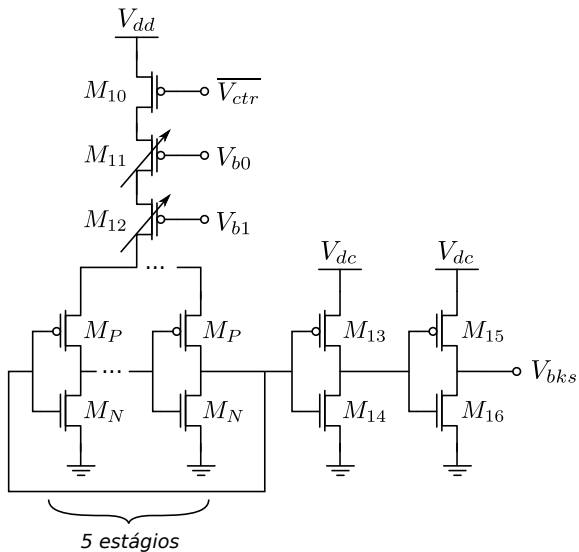
# Calibração - Etapa 1

$$TC_I \simeq \frac{1}{V_{t9}} \frac{\partial V_{t9}}{\partial T} - \frac{1}{R_1} \frac{\partial R_1}{\partial T} = TC_{V_{t9}} - TC_{R_1}$$

- Calibra TC
- Resistor mínimo:  $R_0$
- Resistor máximo:  $R_0 + R + \dots + 2^{N-1}R$
- Passo de calibração:  $R$
- $R_0$ ,  $R$  e  $N$  escolhidos utilizando resultados de simulação Monte Carlo



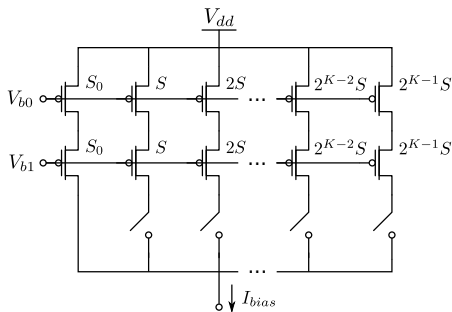
# Oscilador



## Calibração - Etapa 2

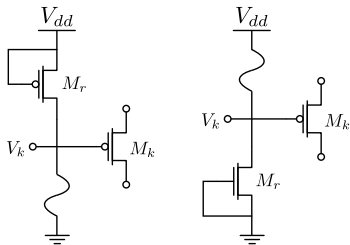
$$I_{bias} = MI_{ref}$$

- Calibra  $I_{bias}(T_0)$ , idealmente não modifica o TC
- W/L mínimo:  $S_0$
- W/L máximo:  $S_0 + S + \dots + 2^{N-1}S$
- Passo de calibração:  $S$
- $S_0, S$  e  $K$  escolhidos utilizando resultados de simulação Monte Carlo

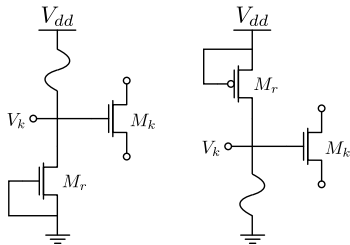


# Calibração - Chaves

Chaves utilizadas no espelho de corrente

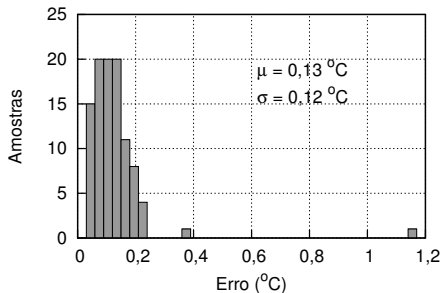
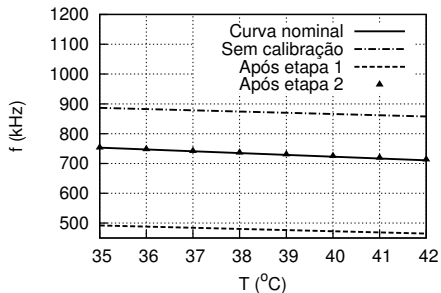


Chaves utilizadas no resistor



- *Shift register* utilizado para executar a calibração (diminui número de *pads*)

# Calibração - Simulação

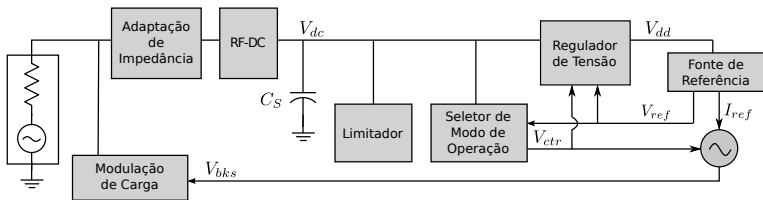




# Sumário

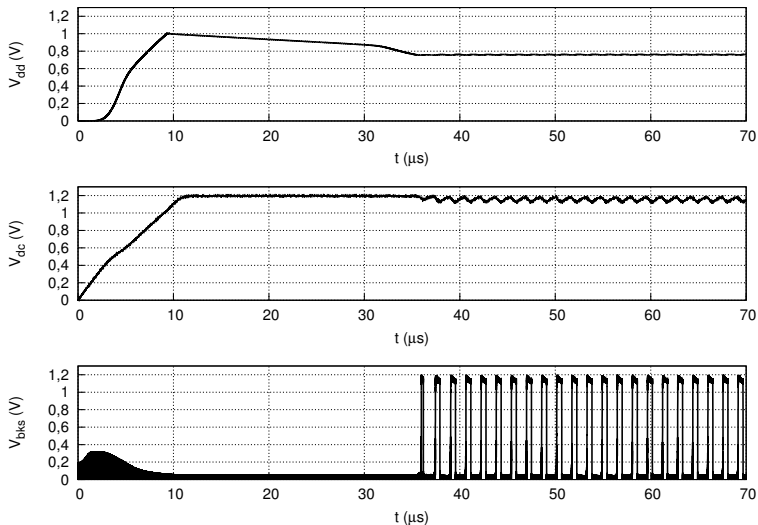
- 1 Introdução
- 2 Definição do Sistema
- 3 Projeto
- 4 Validação por Simulação e Resultados Experimentais Parciais**
- 5 Conclusão

# Validação - Simulação do Sistema

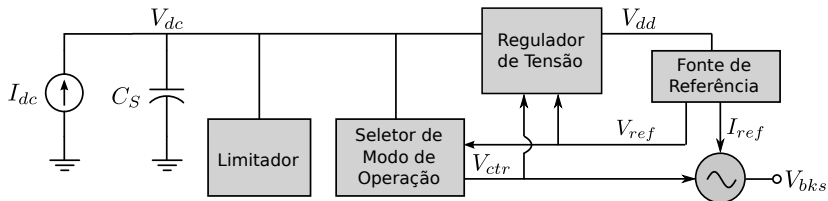


- Sinal de entrada:  $f = 900 \text{ MHz}$ ,  $P_{av} = -8 \text{ dBm}$

# Validação - Simulação do Sistema



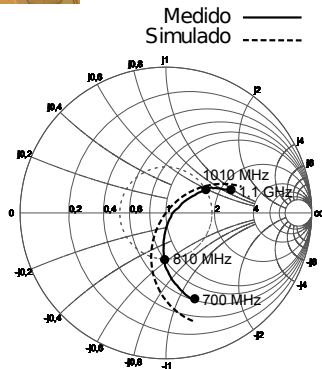
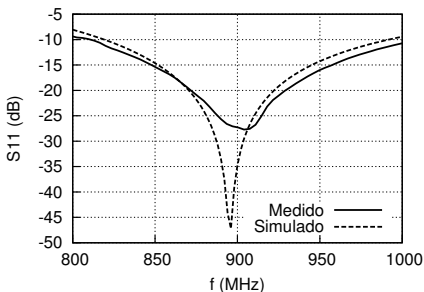
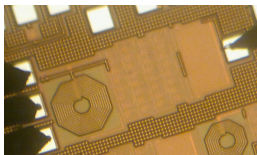
# Validação - Simulação do Sistema



Frequência do oscilador (kHz):

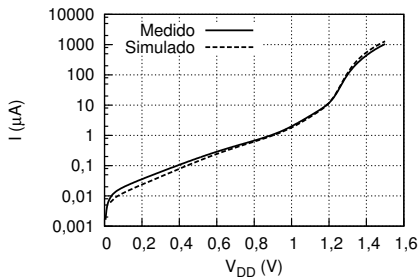
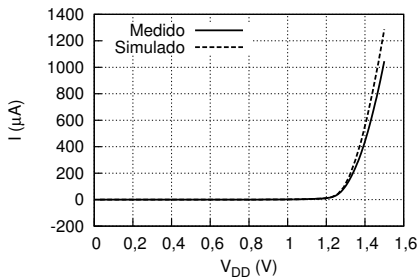
$T$ (°C)	$I_{dc}$ ( $\mu$ A)	Frequência do oscilador (kHz)					
		10	12	50	100	500	1000
	$P_{av}$ (dBm)	-10	-9,2	0,5	5,3	18	23
35		658,4	652	651,2	651,1	651,5	651,8
38,5		633	627,4	627,6	627,5	627,5	626,9
42		606,1	599,8	599,9	599,8	599,4	599,9

# Medições - Retificador

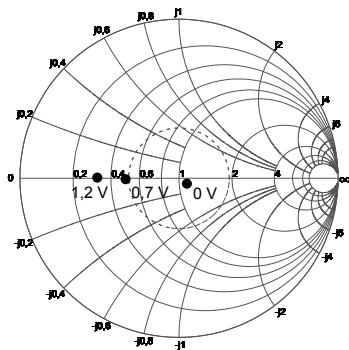
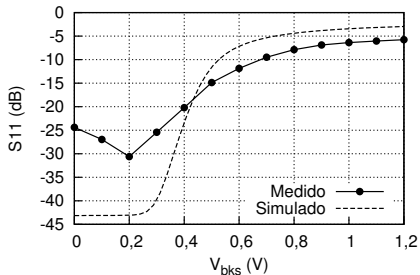


PCE = 10 % para  $P_{av} = -10$  dBm,  $I_L = 10$   $\mu$ A e  $V_{DC} = 1$  V

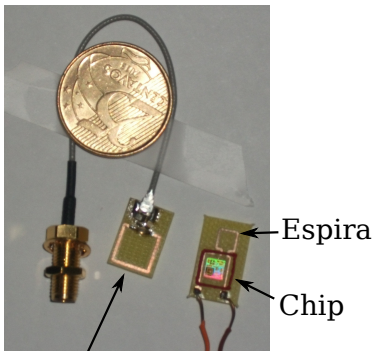
# Medições - Limitador de Tensão



# Medições - Modulação de Carga

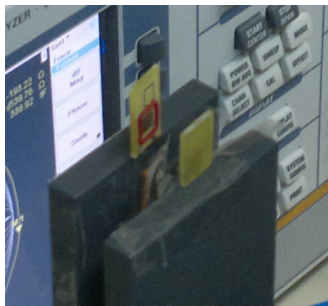


## Medições - Retificador ligado a uma espira



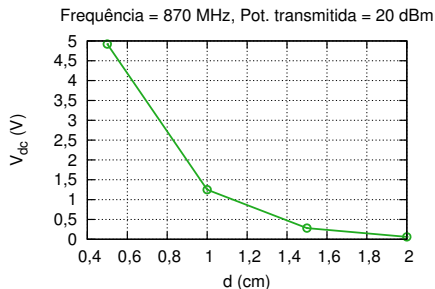
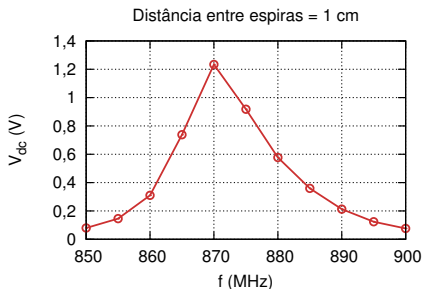
Espira de Saída  
Transmissão

- Carga  $R_L = 100 \text{ k}\Omega$
- Espira com dimensão  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  e  $L \simeq 10 \text{ nH}$





# Medições - Retificador ligado a uma espira



# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Definição do Sistema
- 3 Projeto
- 4 Validação por Simulação e Resultados Experimentais Parciais
- 5 Conclusão**

# Conclusão - Comparação

Referência	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	Este trabalho
Tecnologia (nm)	250	130	130	130	180	130
Frequência (MHz)	450	900	900	868	910	900
Área (mm <sup>2</sup> )	1,2	-	0,95	3,96	1,2	0,34
Cons. <i>standby</i> ( $\mu$ W)	5	6	-	$\approx 0,11$	-	4,9
Cons. ativo ( $\mu$ W)	1500	9	7,9	-	7	8,5
Eficiência RF-DC (%)	-	30	7,6	35	-	10
$P_{av,min}$ (dBm)	-12,5	-12	-10,3	-	-5	-10

[1] KOCER, F.; FLYNN, M. *An rf-powered, wireless cmos temperature sensor*. **Sensors Journal, IEEE, 2006.**

[2] YEAGER, D. et al. *A 9  $\mu$ A, Addressable Gen2 Sensor Tag for Bio-signal Acquisition*. **Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2010.**

[3] REINISCH, H. et al. *A multifrequency passive sensing tag with on-chip temperature sensor and off-chip sensor interface using epc hf and uhf rfid technology*. **Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2011.**

[4] VAZ, A. et al. *Full passive uhf tag with a temperature sensor suitable for human body temperature monitoring*. **Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on, 2010.**

[5] QIAN, J. et al. *A passive UHF tag for RFID-based train axle temperature measurement system*. In: **Custom Integrated Circuits Conference (CICC), 2011 IEEE, 2011.**

# Conclusão - Trabalhos Futuros

- Artigos apresentados:
  - SEMINATEC 2013
  - SBCCI 2013 (setembro)
- É possível aplicar os circuitos de captação e gerenciamento de energia desenvolvidos a diferentes tipos de sensores biomédicos
- Possíveis trabalhos futuros:
  - Testar o sistema completo
  - Melhorar a eficiência do circuito retificador
  - Adicionar compatibilidade com padrões como o EPC Classe 1 Gen2
  - Adicionar mais sensores ao dispositivo