



Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético
CEAAE 2007

***ESTUDO, MODELAMENTO E SIMULAÇÃO DAS
PRINCIPAIS FIGURAS DE MÉRITO DE
FOTODETECTORES INFRAVERMELHOS A
POÇOS QUÂNTICOS***

Aluno:

CT(EN) Ali Kamel Issmael Junior (DSAM)

Orientadores:

Ten Cel Av Fabio Durante Alves (ECEMAR)

Cap Av Ricardo Augusto Tavares (ITA)

Motivação



- ***uma faixa ampla do espectro infravermelho;***
- ***alto poder discriminativo (640×512 linhas) em mais de duas cores;***
- ***custo significativamente baixo em integração de software e hardware.***

Objetivo

Estudo dos processos de detecção de radiação infravermelha que utilizam a tecnologia de poços quânticos, que influenciam nas principais figuras de mérito; a simulação e análise de alguns modelos disponíveis na literatura; e a comparação com resultados práticos previamente mencionados.

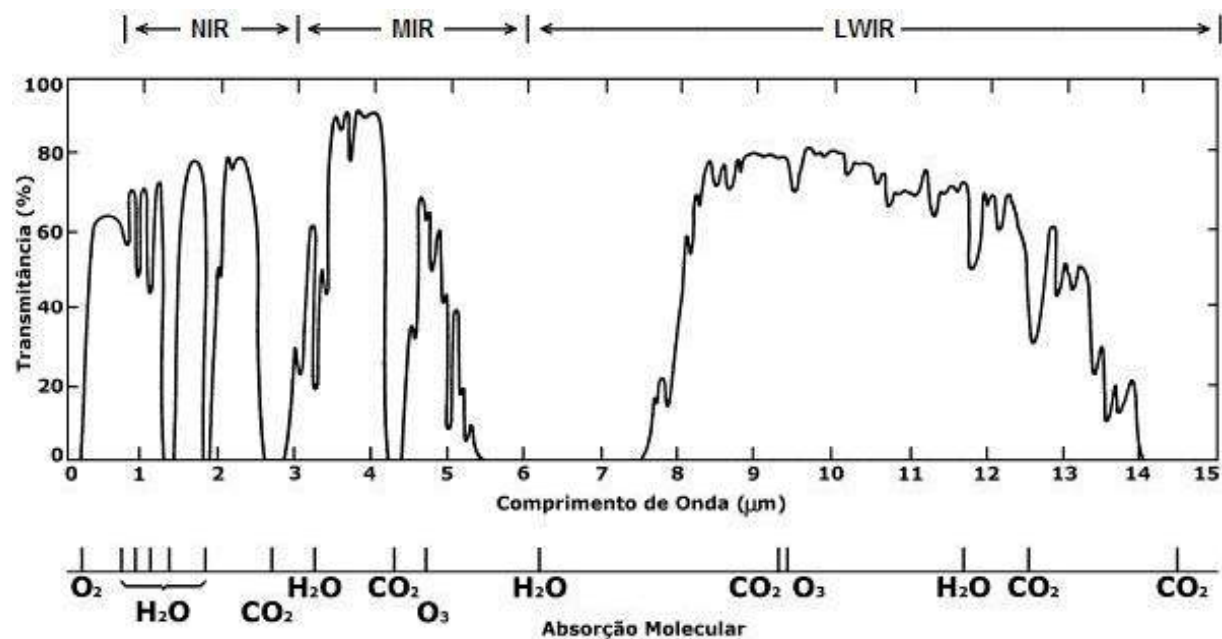
- ***Aspectos Teóricos***
- ***Simulações e Resultados***
- ***Análise de resultados***
- ***Conclusão***

- ***Aspectos Teóricos***
- *Simulações e Resultados*
- *Análise de resultados*
- *Conclusão*

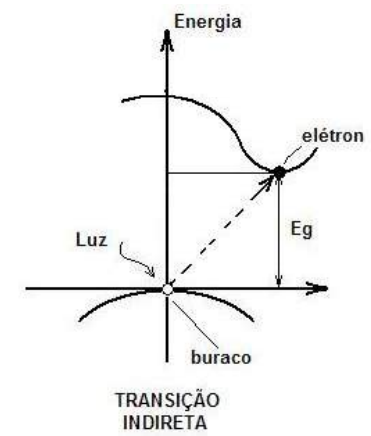
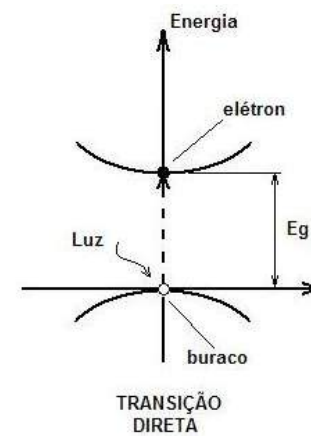
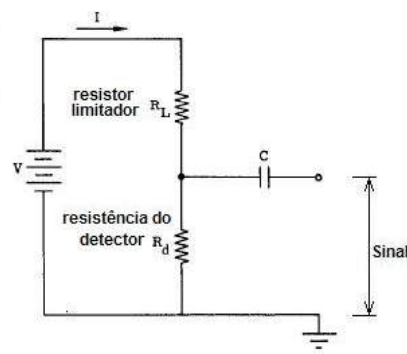
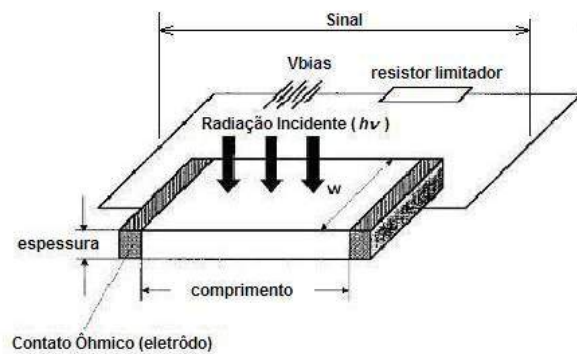
Aspectos Teóricos

Subdivisões da Faixa de Radiação Infravermelha [4]

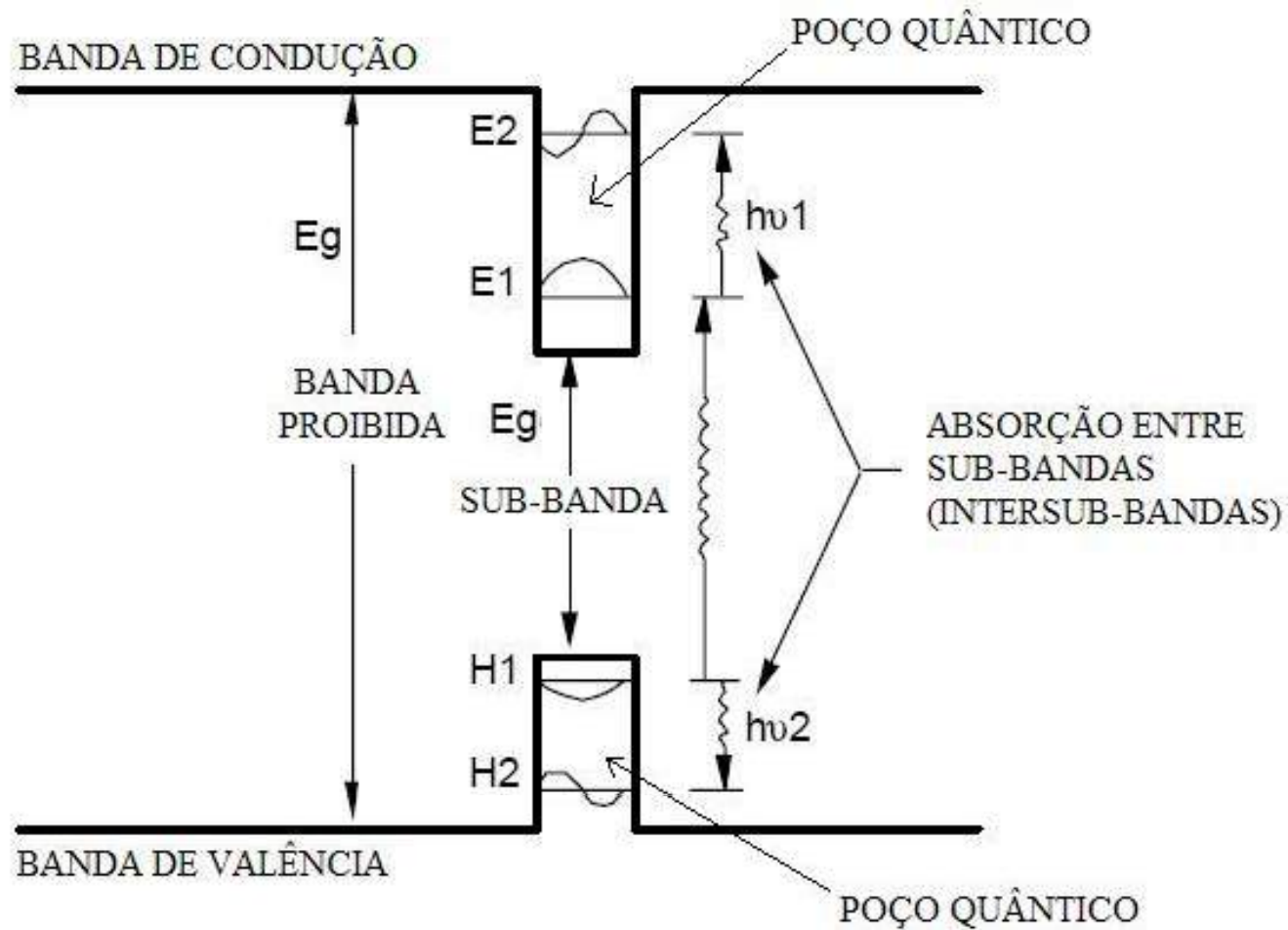
Nomenclatura	Abreviatura	Limites (μm)
Infravermelho Próximo	NIR	0,75 a 3
Infravermelho Médio	MIR	3 a 6
Infravermelho Longo	LWIR	6 a 15
Infravermelho Muito Longo	VLWIR	15 a 1000



Detectores Fotocondutores



QWIPs



Aspectos Teóricos

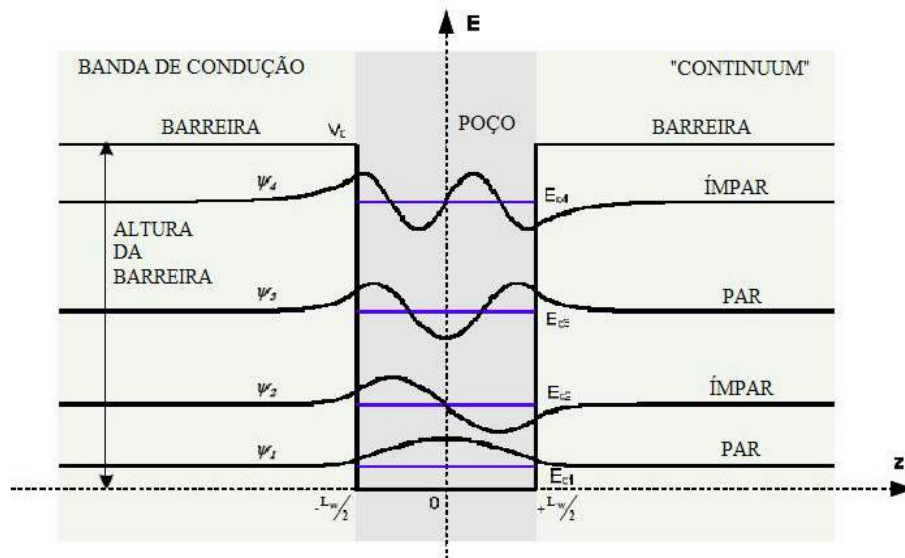
Confinamento Quântico:

- Comprimento de onda de De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{2\pi p} = \frac{\hbar}{p} \quad (2.2)$$

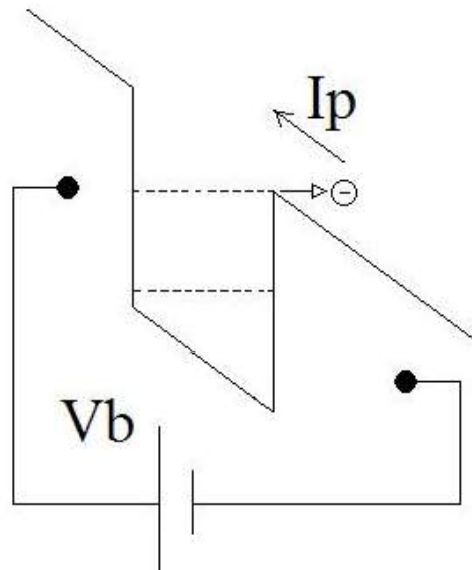
- Níveis de energia discretos no poço (sol. Eq. Schrodinger)

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d}{dz^2} \psi_n(z) + \psi_n(z)V(z) \right) \psi_n(z) = E_n \psi_n(z) \quad (2.3)$$

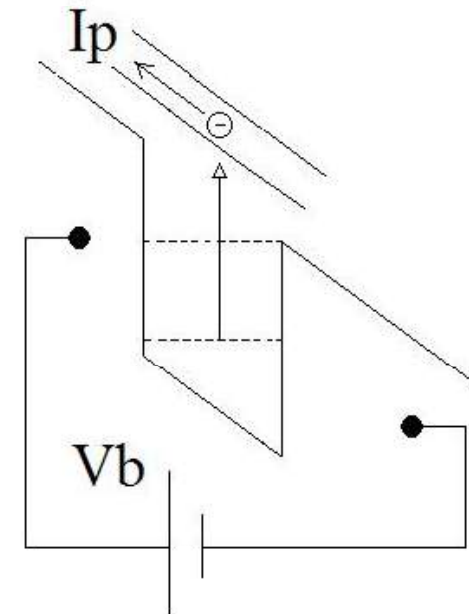


Transições em poços quânticos e Aplicação de Vbias

**Transição
“bound-to-bound”**



**Transição
“bound-to-continuum”**



- ***Espectro de Absorção***
- ***Corrente de Escuro***
- ***Ganho de Fotocondutividade***
- ***Eficiência Quântica***
- ***Responsividade***

Aspectos Teóricos

$$L_w = 52 \text{ \AA}$$

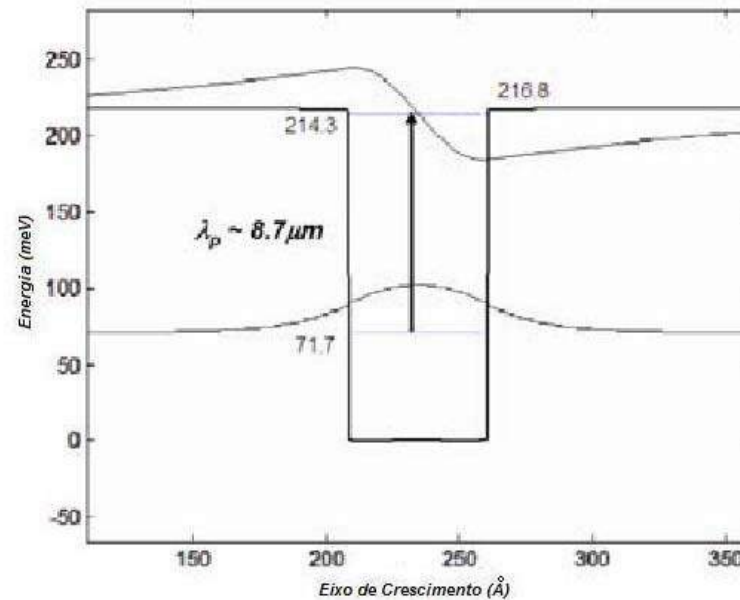
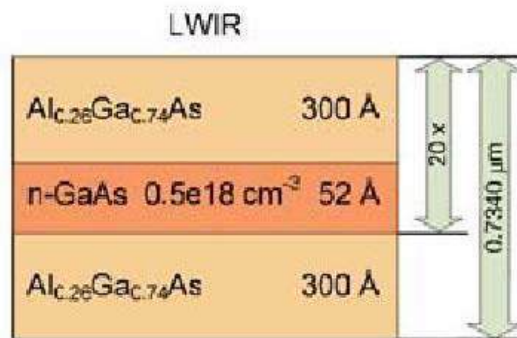
$$L_b = 300 \text{ \AA}$$

Poço: GaAs

Barreira: $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$

$$N_d = 0.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

20 períodos de repetição de poços



QWIP analisado

Aspectos Teóricos

Amostras utilizadas nas simulações

Amostra	Ref	Comprimento da Barreira (Lb) (Å)	Comprimento do poço (Lw) (Å)	Composição barreira	Número de Repetições	Dopagem (cm ⁻³)
A	[4] pg. 62	300	52	Al _{0.26} Ga _{0.74} As	20	0.5.10 ¹⁸
B	[8] pgs. R22 e R29; e [9] pgs.23 e 34	500	40	Al _{0.26} Ga _{0.74} As	50	1.10 ¹⁸
C	[8] pgs. R22 e R29	500	50	Al _{0.26} Ga _{0.74} As	25	0.42.10 ¹⁸
D	[8] pg. R18	305	40	Al _{0.29} Ga _{0.71} As	50	1.4.10 ¹⁸

Roteiro

- *Aspectos Teóricos*
- ***Simulações e Resultados***
- *Análise de resultados*
- *Conclusão*

Simulações e resultados

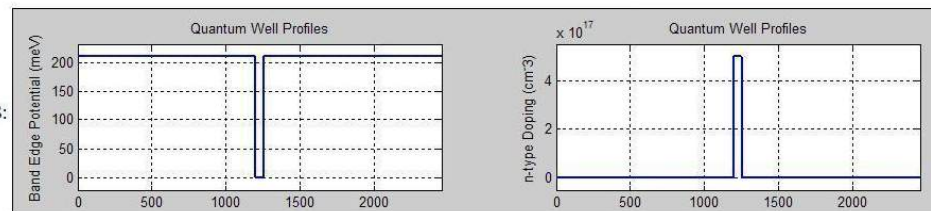
well.m

SAÍDAS:

BARREIRA E POÇO: LARGURA, COMPOSIÇÃO E DOPAGEM
AMBIENTE: CAMPO ELÉTRICO E TEMPERATURA

hetstr.m

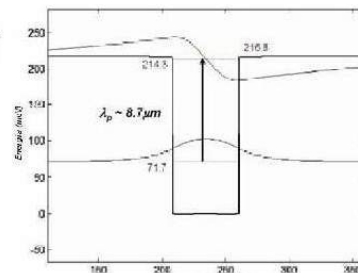
SAÍDAS:



self_con_cb.m

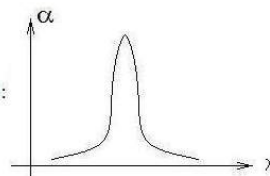
SAÍDAS:

$E_1, E_2, V_{top}, \lambda_p (B-B), \lambda_p (B-C)$



absorp_t.m

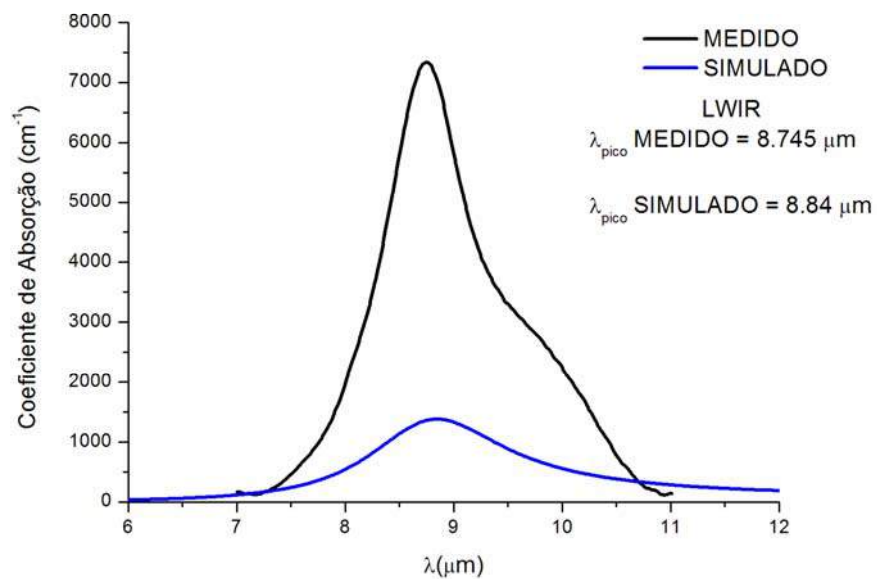
SAÍDA:



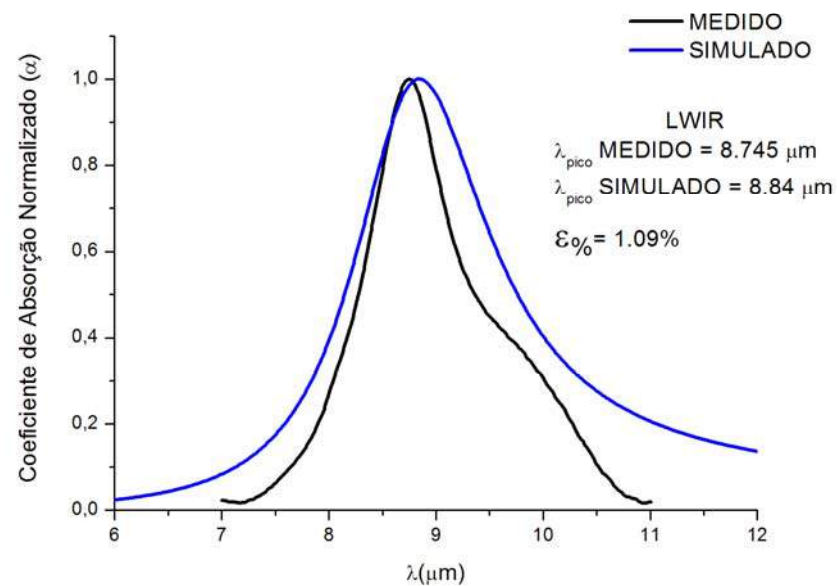
Espectro de absorção

Simulações e resultados

Resultado em Valores Absolutos



Resultado em Valores Normalizados

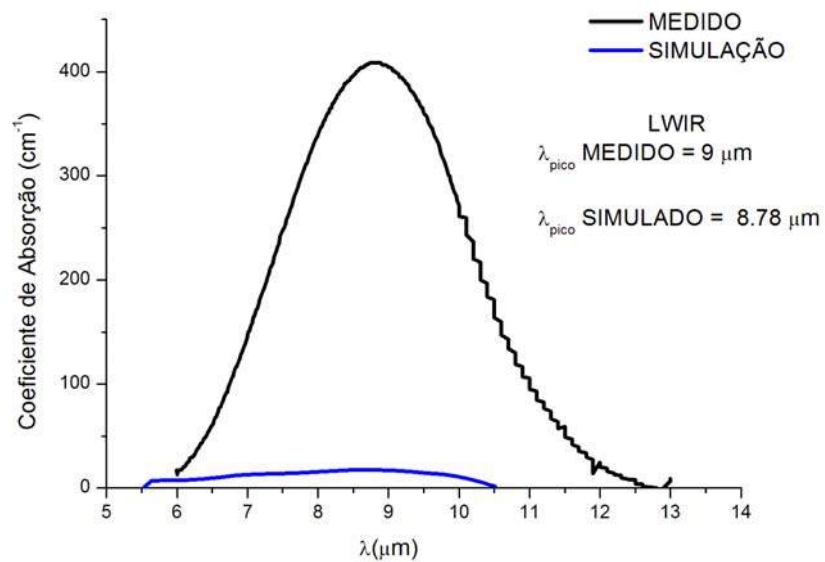


Amostra A - Durante

Espectro de absorção

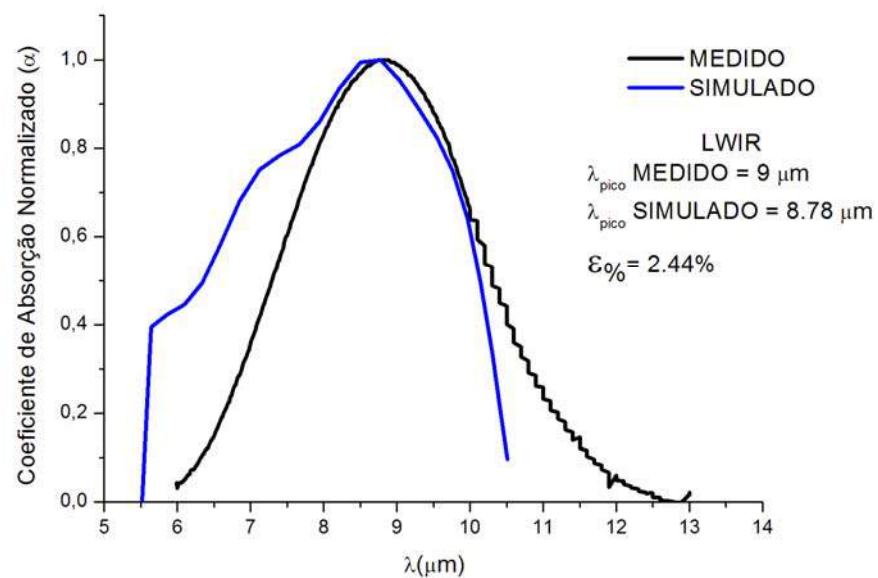
Simulações e resultados

Resultado em Valores Absolutos



Amostra B - Levine

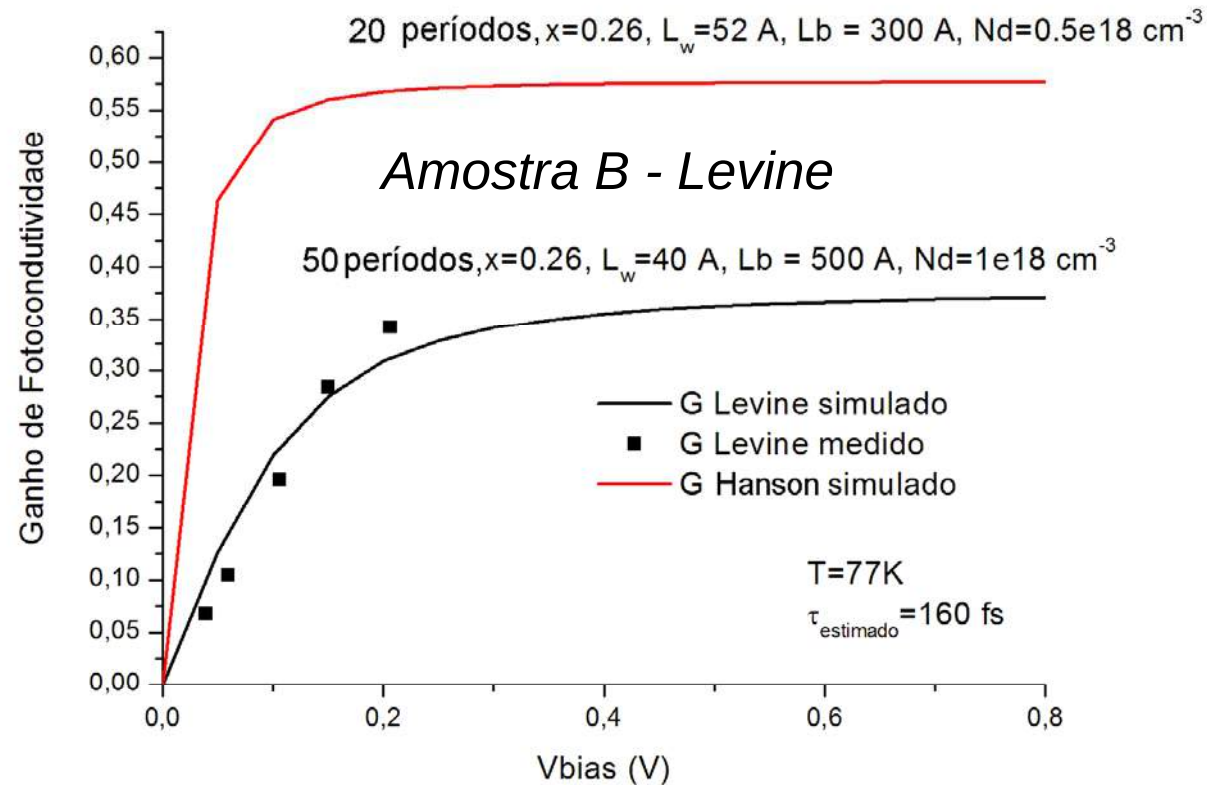
Resultado em Valores Normalizados



Espectro de absorção

Simulações e resultados

Amostra A – Durante



$$G = \frac{\tau}{L / v(F)}$$

Ganho de fotocondutividade

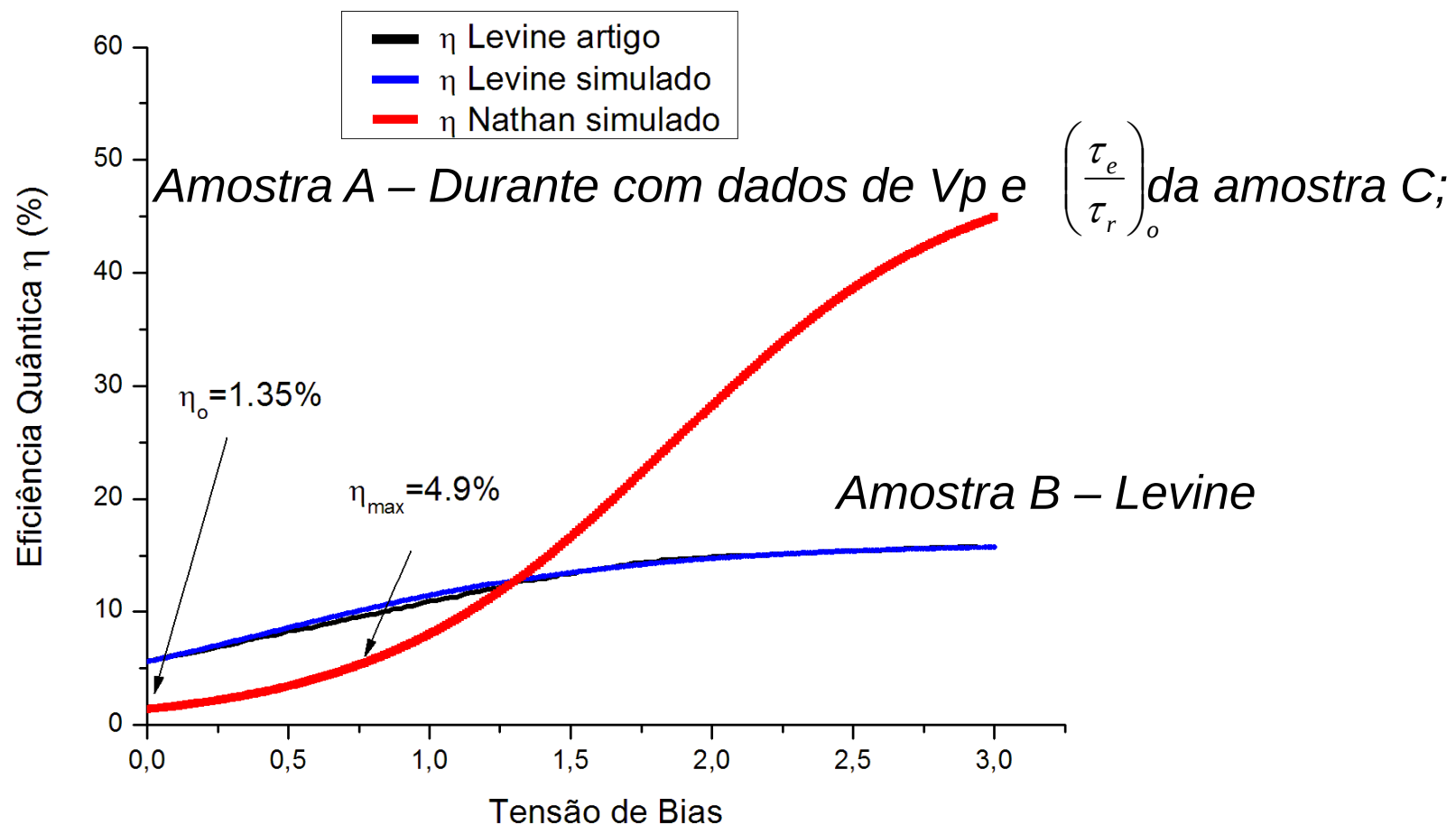
$$\frac{\tau_e}{\tau_r}(V) = \left(\frac{\tau_e}{\tau_r} \right)_o e^{-\frac{V}{V_p}} \quad (2.37)$$

$$\eta_a = (1 - e^{-2\alpha_p \cdot l}) \quad (2.35)$$

$$p_e(V) = \left(1 + \frac{\tau_e}{\tau_r}(V) \right)^{-1} \quad (2.36)$$

$$\eta = \eta_a \cdot p_e(V) \quad (2.34)$$

Simulações e resultados



Eficiência quântica

Simulações e resultados

O cálculo da corrente I_d é um procedimento complexo que prevê o cálculo de algumas grandezas, necessárias na determinação do resultado final:

- Massa efetiva do elétron (m^*) - (poço, barreira e ponderada no detector);***
- Mobilidade do elétron (μ) - (poço, barreira e ponderada no detector);***
- Velocidade de Saturação (v_{sat}) - (poço, barreira e ponderada no detector);e***
- Além dessas grandezas, o pacote de rotinas self_con_cb gerou o nível de energia estacionário (E_1) e a altura do poço (V_o).***
- Para esta figura de mérito foram testados dois modelos: um com μ e v_{sat} constantes (valores tomados a 77 K - Levine-[8]) e outro variáveis com a temperatura (T) e a composição do Alumínio no ternário (x) - (Institute of Microelectronic Site - [18] e [19])***

Modelo da Corrente de Escuro

$$I_D(F) = \frac{e \cdot v_{drift} \cdot A m_w^*}{\pi \hbar^2 L} \int_{E_1}^{\infty} f^{FD}(E) T(E, F) dE \quad (2.49)$$

$$v_{drift} = \frac{\mu_n F}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_n F}{v_s} \right)^2}} \quad (2.9)$$

$$f^{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}} \quad (2.18)$$

Fator de Corrente de Tunelamento

$$T(E, F) = \exp \left(- \frac{4L_b}{3eV} \left(\frac{2m^*}{\hbar} \right)^{\frac{1}{2}} \left[(V_o - E)^{\frac{3}{2}} - (V_o - E - eV)^{\frac{3}{2}} \right] \right) \quad E_o < E < V_o - eV \quad (2.19)$$

$$T(E, F) = \exp \left(- \frac{4L_b}{3eV} \left(\frac{2m^*}{\hbar} \right)^{\frac{1}{2}} (V_o - E)^{\frac{3}{2}} \right), \quad V_o - eV < E < V_o \quad (2.20)$$

$$T(E, F) = 1 \quad E > V_o \quad (2.21)$$

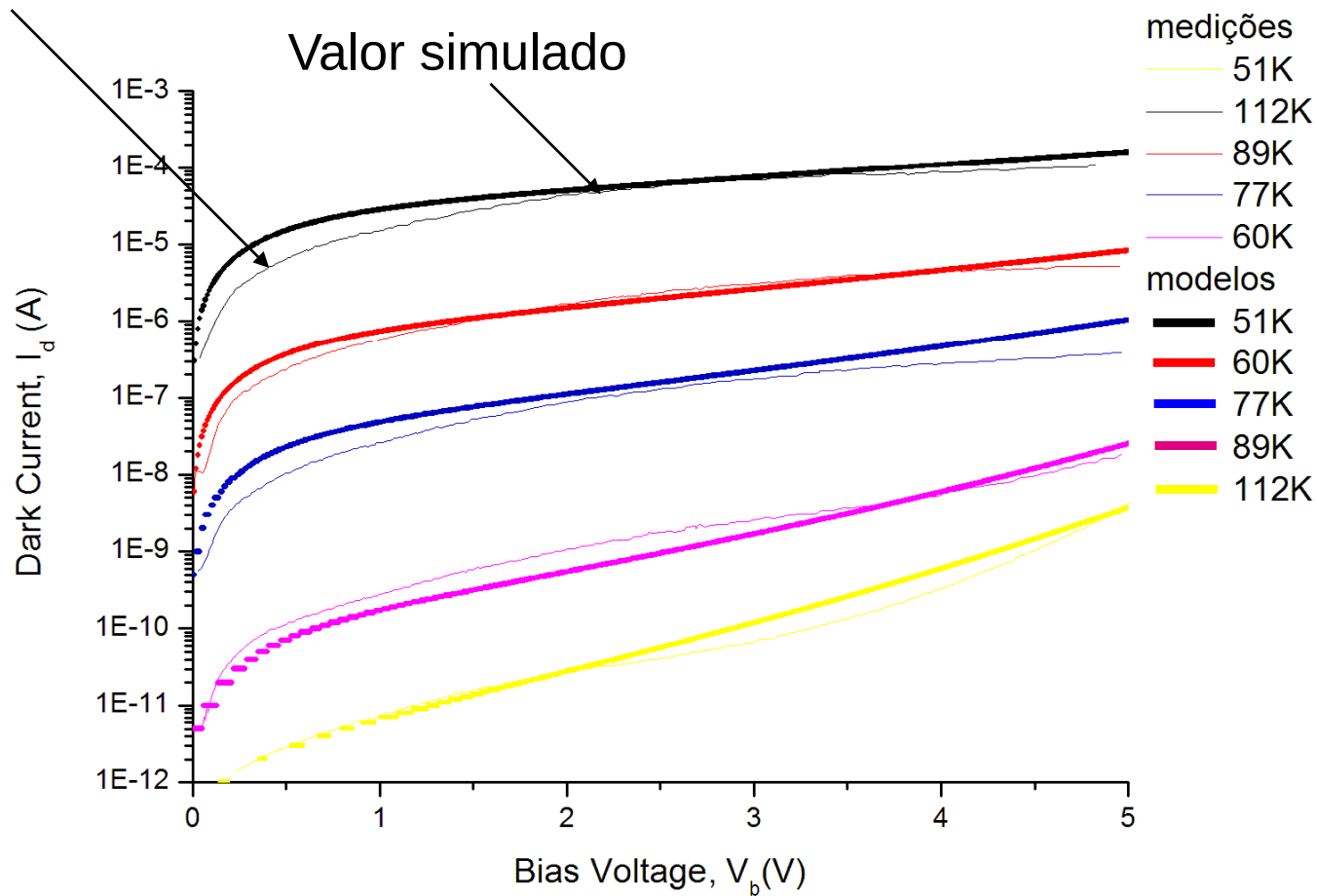
Modelo ref.[13] – Andrews e Miller

Simulações e resultados

Detector de Levine[8]

- μ e v_{sat} constantes
- $E_i = 0.0986 \text{ meV}$
- $V_o = 0.23 \times 1,09$
- $erro = 0.2507 \text{ meV}$
- dados gerados pelo pacote[4]

Valor medido Amostra D - Levine



Corrente de escuro

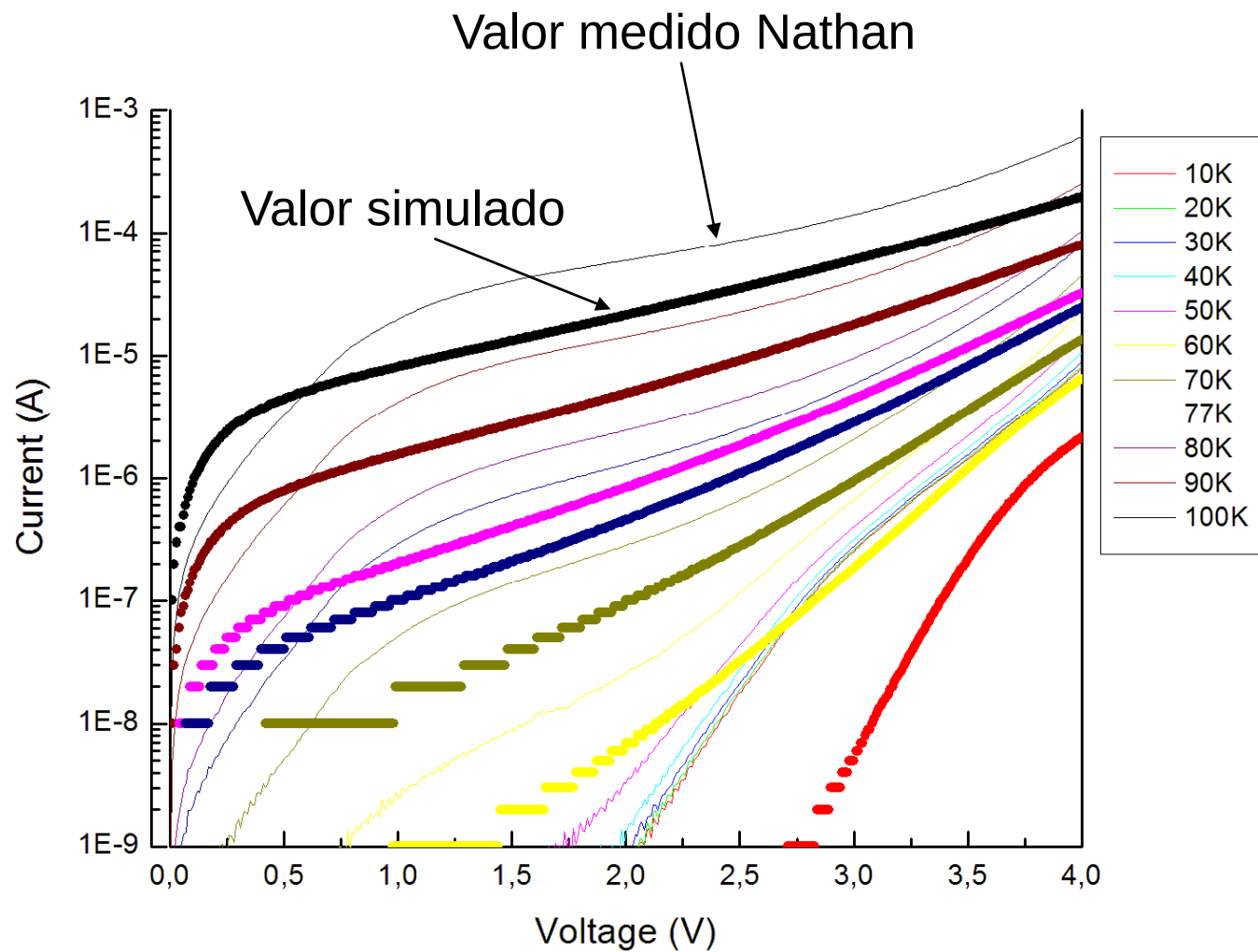
Simulações e resultados

Amostra A - Durante

Detector de Durante[4]

□ μ e v_{sat} constantes

- $E_1 = 0.071$ eV
- $V_o = 0.2088$ eV (sem correção de erro)
- dados gerados pelo pacote[4]



Corrente de escuro

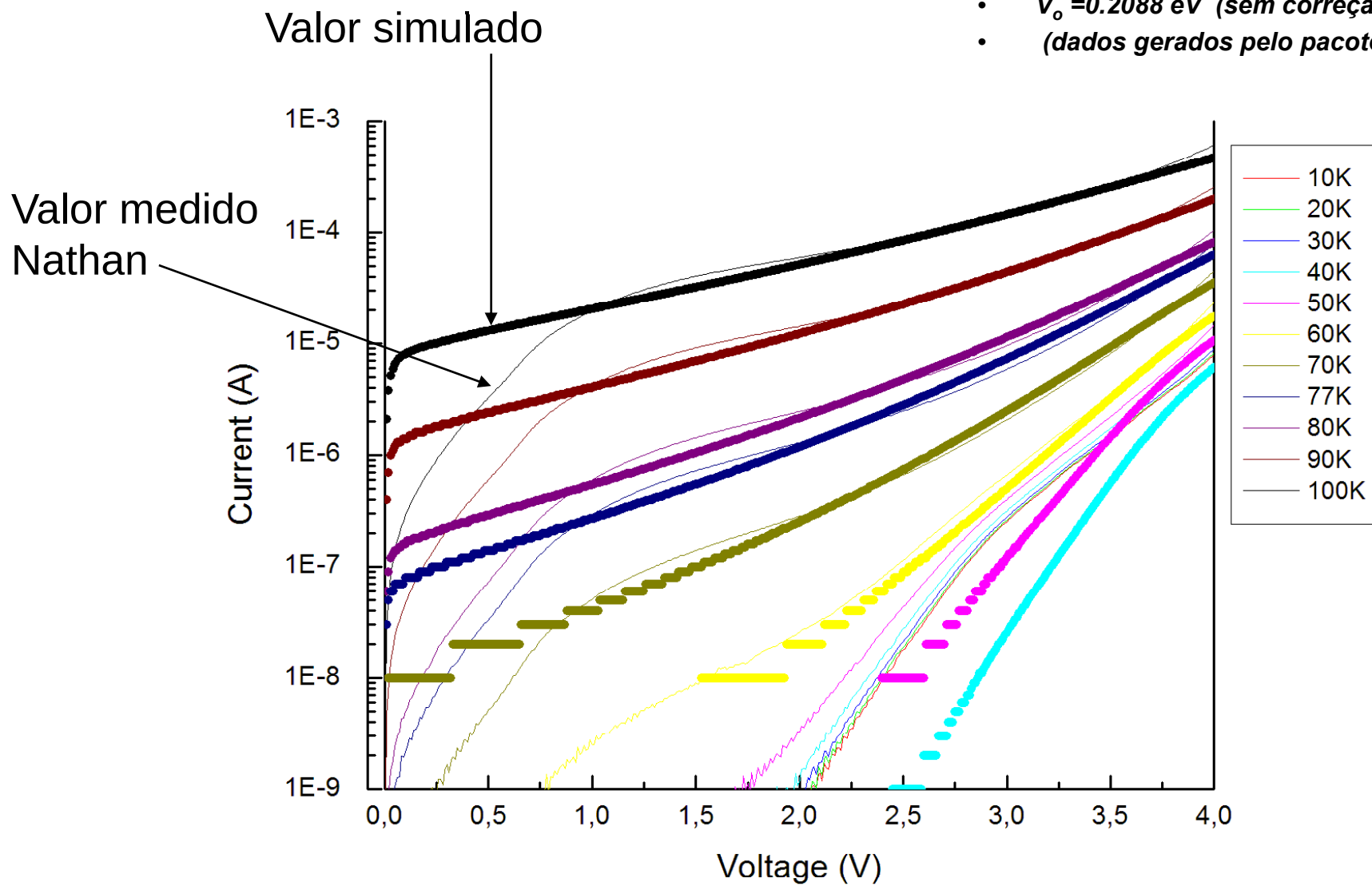
Simulações e resultados

Amostra A - Durante

Detector de Durante[4]

□ μ e v_{sat} variáveis com T e x .

- $E_i = 0.071$ eV
- $V_o = 0.2088$ eV (sem correção de erro)
- (dados gerados pelo pacote[4])



Corrente de escuro

Simulações e resultados

Modelo aplicado Durante[4]

$$I_p(F) \approx \frac{2q\Phi_o}{\hbar\omega} \alpha L_w \left(\sum_{n=1}^N e^{-\frac{nL}{v(F)\tau}} \right) \quad (2.8)$$
$$G = \sum_{n=1}^N e^{-\frac{nL}{v(F)\tau}} \quad (2.13)$$

$$I_p(F) \approx \frac{2q\Phi_o}{\hbar\omega} \alpha L_w G \quad (2.50)$$

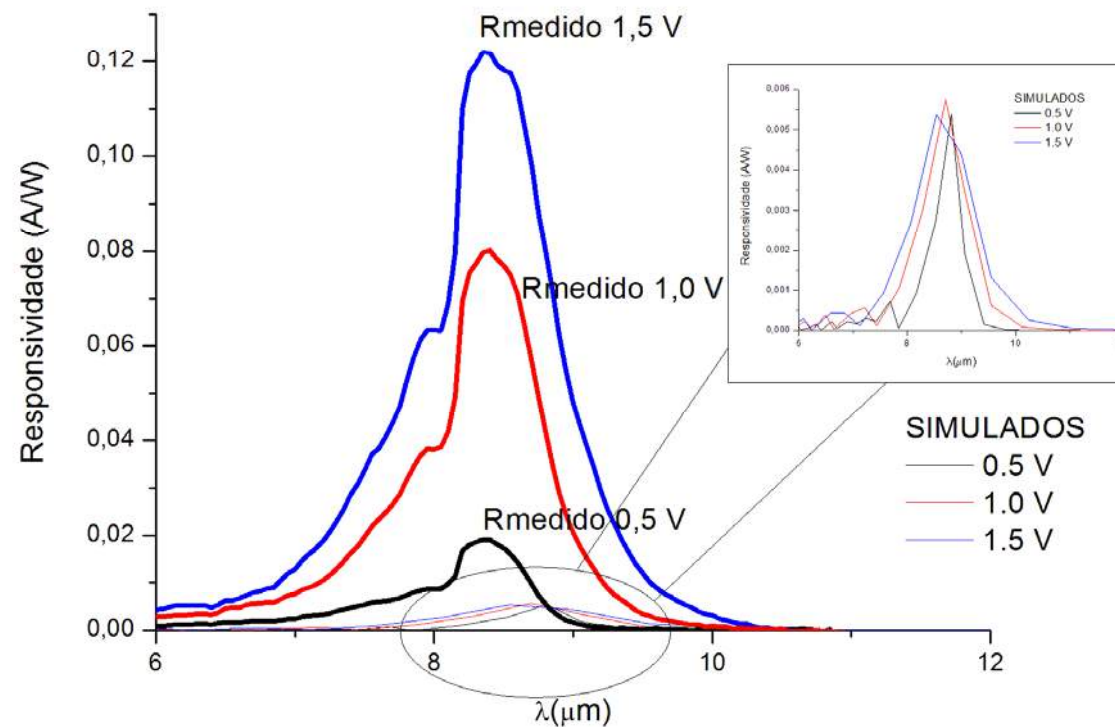
$$R(F) = \frac{I_p(F)}{\Phi_o} \quad (2.5)$$

$$R_p(F) \approx \frac{2q}{\hbar\omega} \alpha L_w G \quad (2.51)$$

Responsividade

Simulações e resultados

Foram realizadas simulações para as tensões de 0.5, 1.0 e 1.5 V, para uma temperatura de 10 K, pois foi a mesma utilizada nas medições realizadas por Hanson [5]. Iniciou-se pelos valores absolutos.

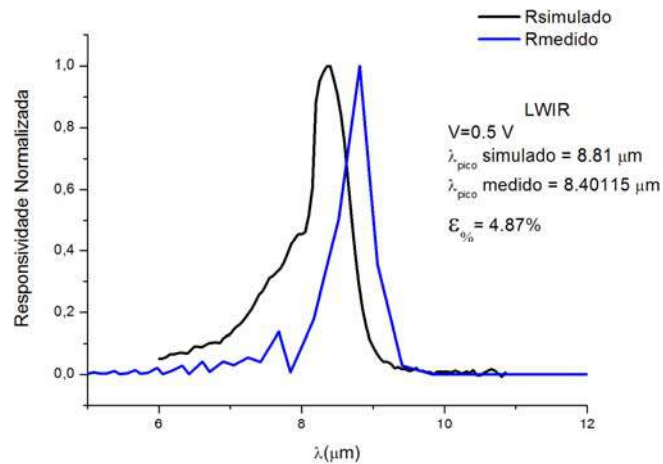


Amostra A - Durante

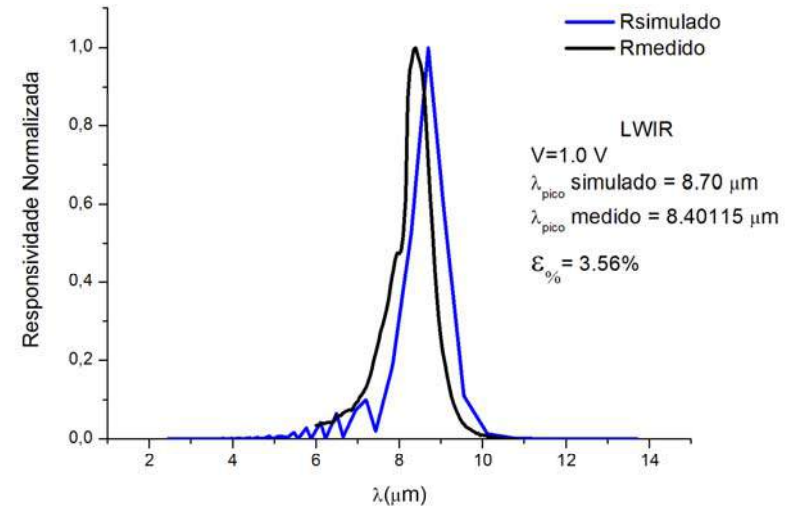
Responsividade

Simulações e resultados

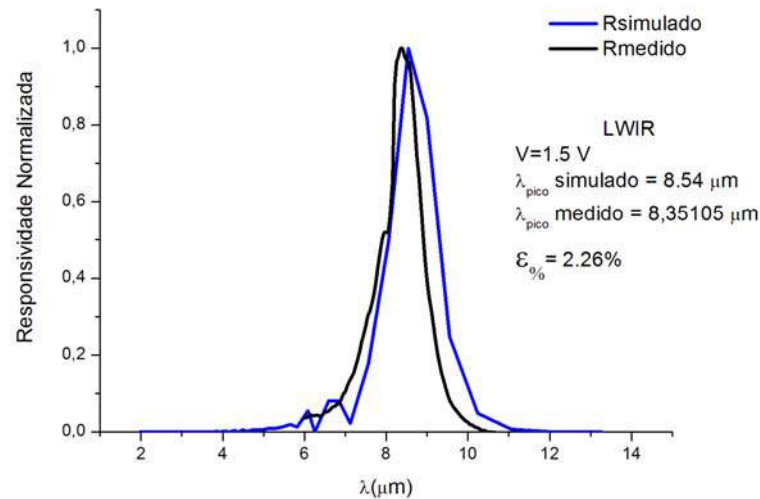
$V_{bias} = 0,5 \text{ V}$



$V_{bias} = 1,0 \text{ V}$



$V_{bias} = 1,5 \text{ V}$



Erro na referência do nível de Energia no poço. Nesse cálculo a Referência está no 'canto' do poço, Quando o correto é no centro do poço.

Responsividade

Roteiro

- *Aspectos Teóricos*
- *Simulações e Resultados*
- ***Análise de resultados***
- *Conclusão*

Análise de resultados

- ***Espectro de Absorção:*** Os resultados se mostraram satisfatórios em relação à previsão do comprimento de onda de pico onde a absorção é máxima, mesmo com as limitações do modelo e a diferença entre os valores absolutos medidos e calculados. Dessa forma, pode-se dizer que este modelamento atendeu a expectativa, que era o cálculo do comprimento de onda onde a absorção é máxima, mas que precisa ser aperfeiçoado devido aos resultados absolutos.
- ***Ganho de Fotocondutividade:*** o modelo está correto, mas é limitado pelo uso da constante τ , sendo necessário maior pesquisa na literatura ou medições no detector em análise para se chegar ao valor correto do tempo de meia vida do elétron no poço.
- ***Eficiência Quântica:*** o modelo está correto, mas com o resultado limitado e que precisa ser melhorado com relação a obtenção de V_p , e $(\tau_e/\tau_r)_0$.

Análise de resultados

- ***Corrente de Escuro: cada modelo obteve uma performance satisfatória em condições de simulação diferentes, não se devendo descartar nenhum dos dois. Esses resultados devem ser analisados mais profundamente para a definição de qual modelo deve ser escolhido para implementação e aplicação.***
- ***Responsividade: o método utilizado está de acordo e que atende as expectativas. Porém foi verificado, um erro de referência para o nível de “energia zero”. Verifica-se, então, que o método utilizado é válido, mas que precisa ser corrigido. Essa correção está sendo feita e será implementada para a versão final do trabalho.***

Roteiro

- *Aspectos Teóricos*
- *Simulações e Resultados*
- *Análise de resultados*
- ***Conclusão***

Conclusão

O objetivo de estudar os processos de detecção de radiação infravermelha que utilizam a tecnologia de poços quânticos, gerando modelos matemáticos das principais figuras de mérito, tais como coeficiente de absorção, corrente de escuro, eficiência quântica, ganho e responsividade, que simulem sua performance e comparando os resultados alcançados com resultados disponíveis na literatura especializada no intuito de validar os modelos desenvolvidos foi atingido. Porém há a necessidade de se melhorar os resultados, conforme discutido anteriormente.

- ***Aspectos Teóricos***
- ***Simulações e Resultados***
- ***Análise de resultados***
- ***Conclusão***

Considerações finais

Verifica-se que as considerações feitas durante o trabalho colaboram com o esforço que vem sendo feito pelas Forças Armadas em ampliar seu conhecimento técnico na área de fotodetecção .

Propostas para trabalhos futuros

- ***Devem ser verificados modelos físicos para baixas temperaturas para a velocidade de saturação (v_{sat}), a mobilidade do elétron (m) e o fator de tunelamento para uma barreira simples $T(E,V)$;***
- ***A revisão dos pacotes de rotinas de Durante, pois os resultados dos cálculos dos coeficientes de absorção e dos níveis de energia do poço, mais especificamente o nível estacionário (E_1) e a altura da barreira (V_0), influenciaram nos erros das simulações;***
- ***Implementação de rotinas de simulação para a fotocorrente e a figura de mérito detectividade, que não puderam ser incluídas neste trabalho; e***
- ***Realização de novas medições no detector de Durante, de forma a corroborar os modelos das demais figuras de mérito.***

Reflexão

“O espírito de pioneirismo ainda é vigoroso neste país. A ciência oferece um território quase inexplorado para o pioneiro que possui as ferramentas para cumprir sua tarefa. As recompensas dessa exploração, para a Nação e para o indivíduo, são muito grandes. O progresso científico é um elemento essencial para nossa segurança como nação, para uma saúde melhor, para mais empregos, para um melhor padrão de vida e para nosso progresso cultural.”



Vannevar Bush
(1890-1974)