

IX SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GUERRA ELETRÔNICA DO ITA

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

Aluno:

CT(EN) Ali Kamel Issmael Junior (DSAM)

ali.kamel@dsam.mar.mil.br

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.***

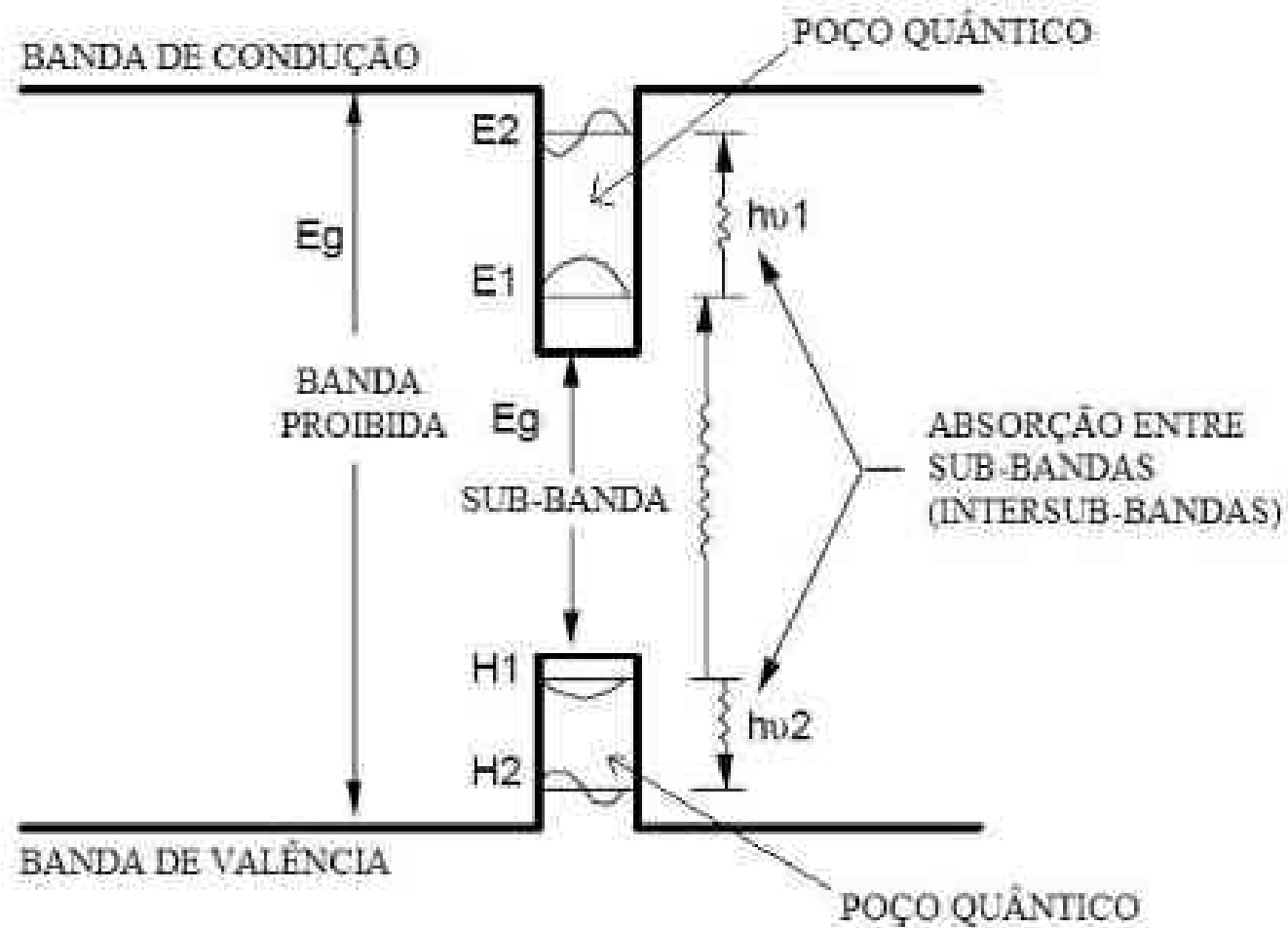
Objetivo

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***

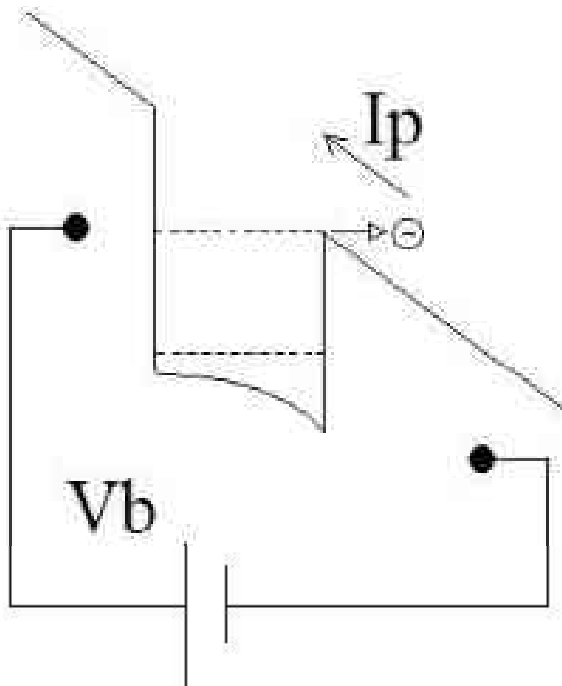
- ***Aspectos Teóricos***
- *Simulações e Resultados*
- *Análise de resultados*
- *Conclusão*

QWIPs

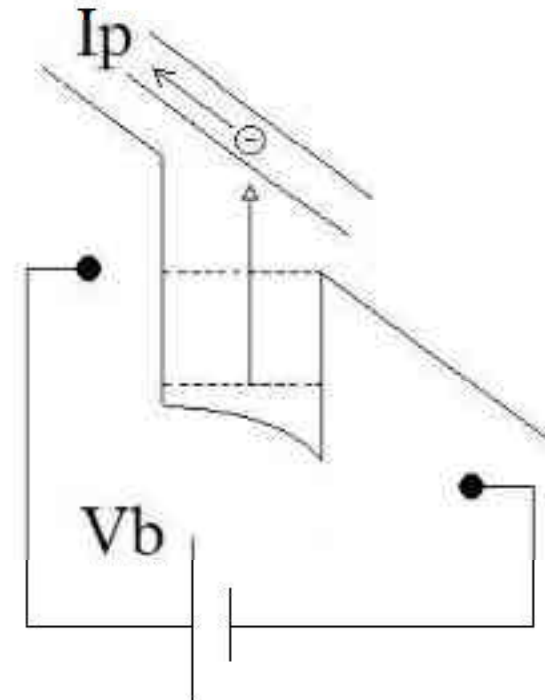


Transições em poços quânticos e Aplicação de V_b

*Transição
“bound-to-bound”*



*Transição
“bound-to-continuum”*



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

Aspectos Teóricos

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

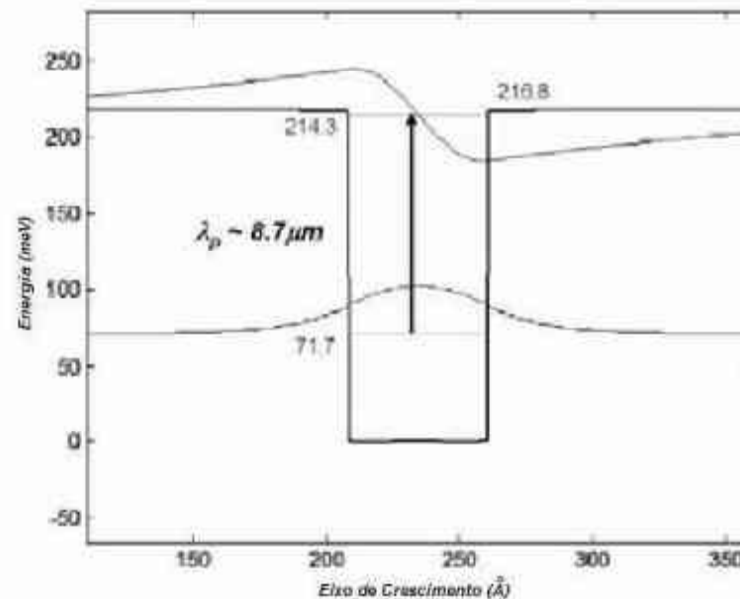
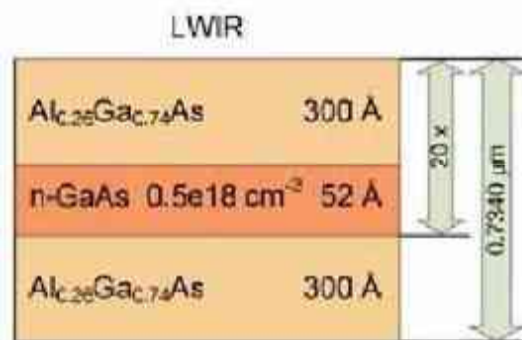
$$L_b = 300 \text{ \AA}$$

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

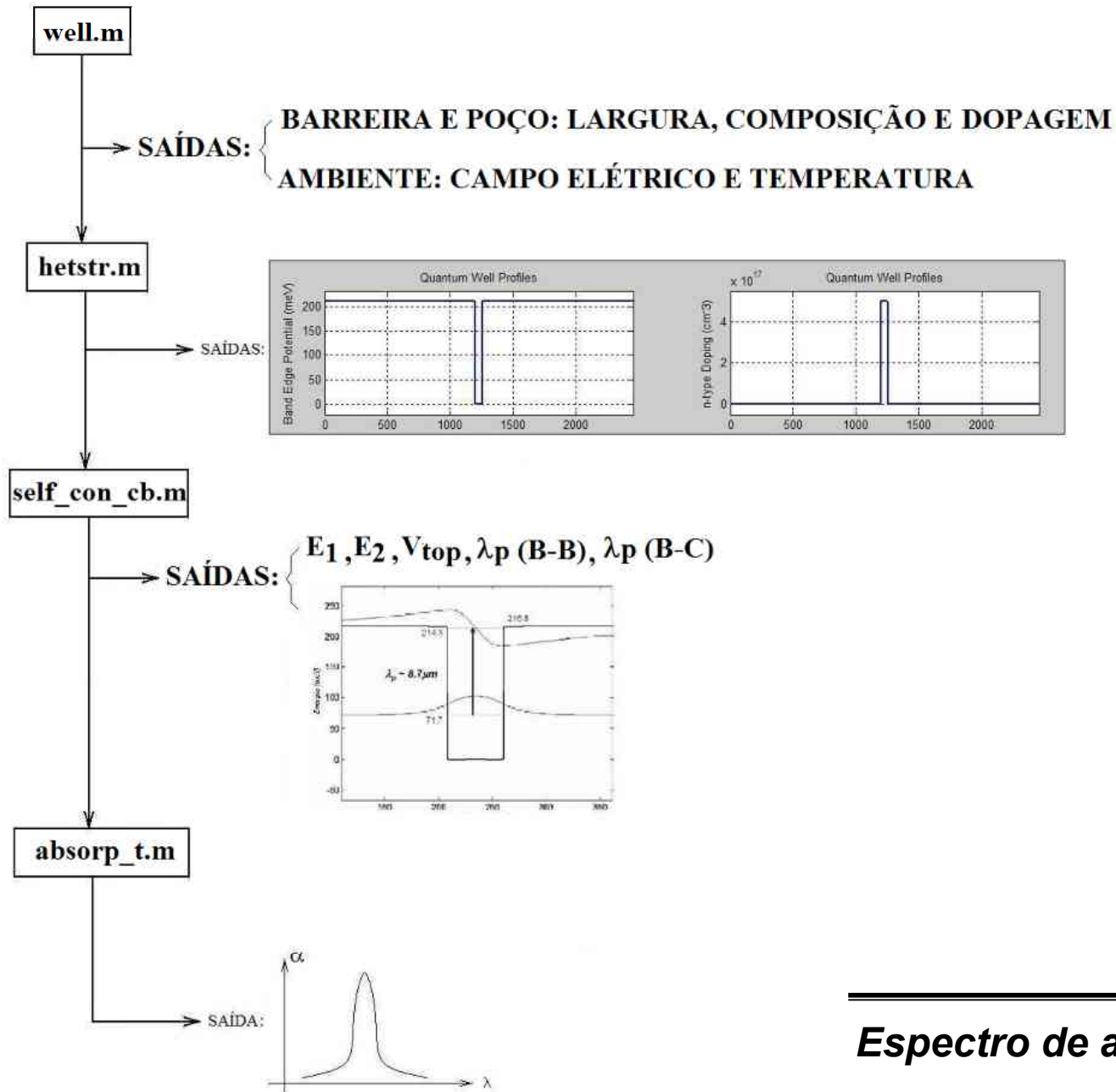
Aspectos Teóricos

Amostra	Ref	Comprimento da Barreira (Lb) (Å)	Comprimento do poço (Lw) (Å)	Composição barreira	Número de Repetições	Dopagem na Poço (cm ⁻³)
A	[4] pg. 62	300	52	Al _{0.26} Ga _{0.74} As	20	0.5.10 ¹⁸
B	[7] pgs. R22 e R29; e [8] pgs. 23 e 34	500	40	Al _{0.26} Ga _{0.74} As	50	1.10 ¹⁸
C	[7] pgs. R22 e R29	500	50	Al _{0.26} Ga _{0.74} As	25	0.42.10 ¹⁸
D	[7] 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



Espectro de absorção

Simulações e resultados

Programa Absorp_t.m

Absorção – contribuição das Transições “bound-to-continuum”

$$\alpha_{CbCb}(\hbar\omega) = \frac{q^2 d}{(m_e^*)^2} \frac{\hbar^3}{\varepsilon_o n_r c(\hbar\omega)} \left| \left\langle \psi_f(z) \left| \frac{\partial}{\partial z} \right| \psi_i(z) \right\rangle \right|^2 X \cos^2(\phi) \frac{\Gamma}{(E_f - E_i - \hbar\omega)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (1)$$

Absorção – contribuição das Transições “bound-to-bound”

$$\alpha_{CbCc}(\hbar\omega) = \frac{q^2 d}{(m_e^*)^2} \frac{\hbar^3}{\varepsilon_o n_r c(\hbar\omega)} \frac{L_F}{\pi} \sqrt{\frac{m_{e,b}^*}{2(E_f - V_o)}} X \left| \left\langle \psi_f(z) \left| \frac{\partial}{\partial z} \right| \psi_i(z) \right\rangle \right|^2 X \cos^2(\phi) \quad (2)$$

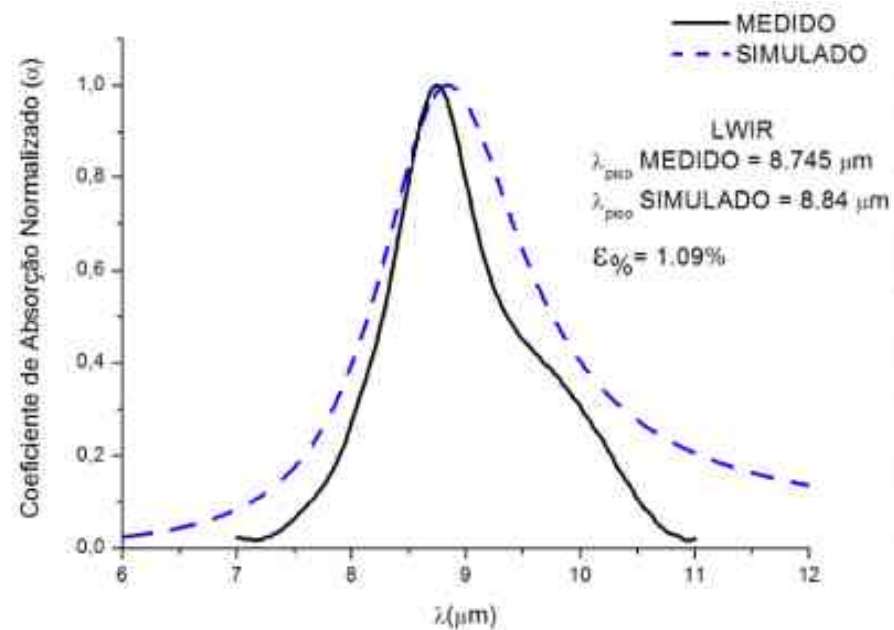
Modelo ref.[4] e [10] – Durante e P.Harrison

Espectro de absorção

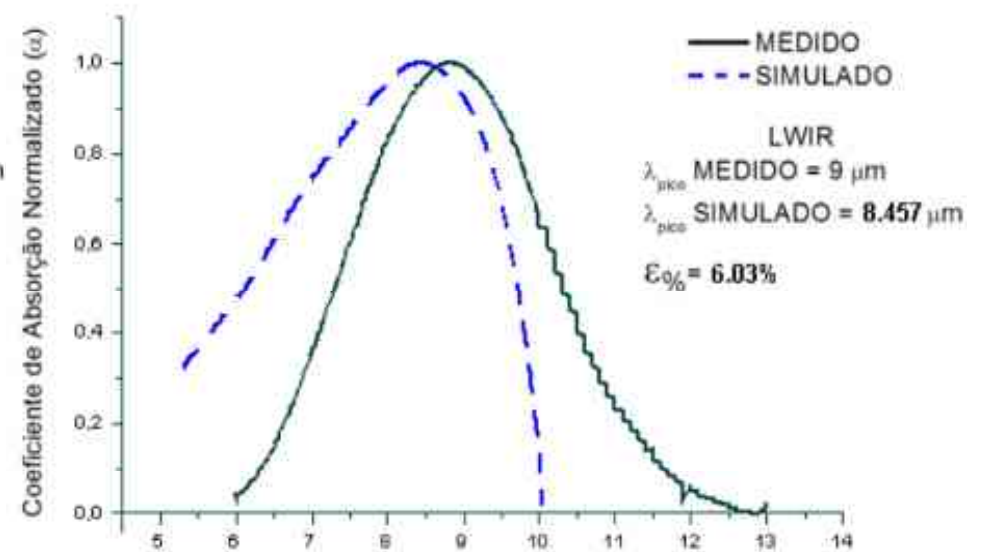
Simulações e resultados

Resultado em Valores Normalizados

Amostra A - Durante



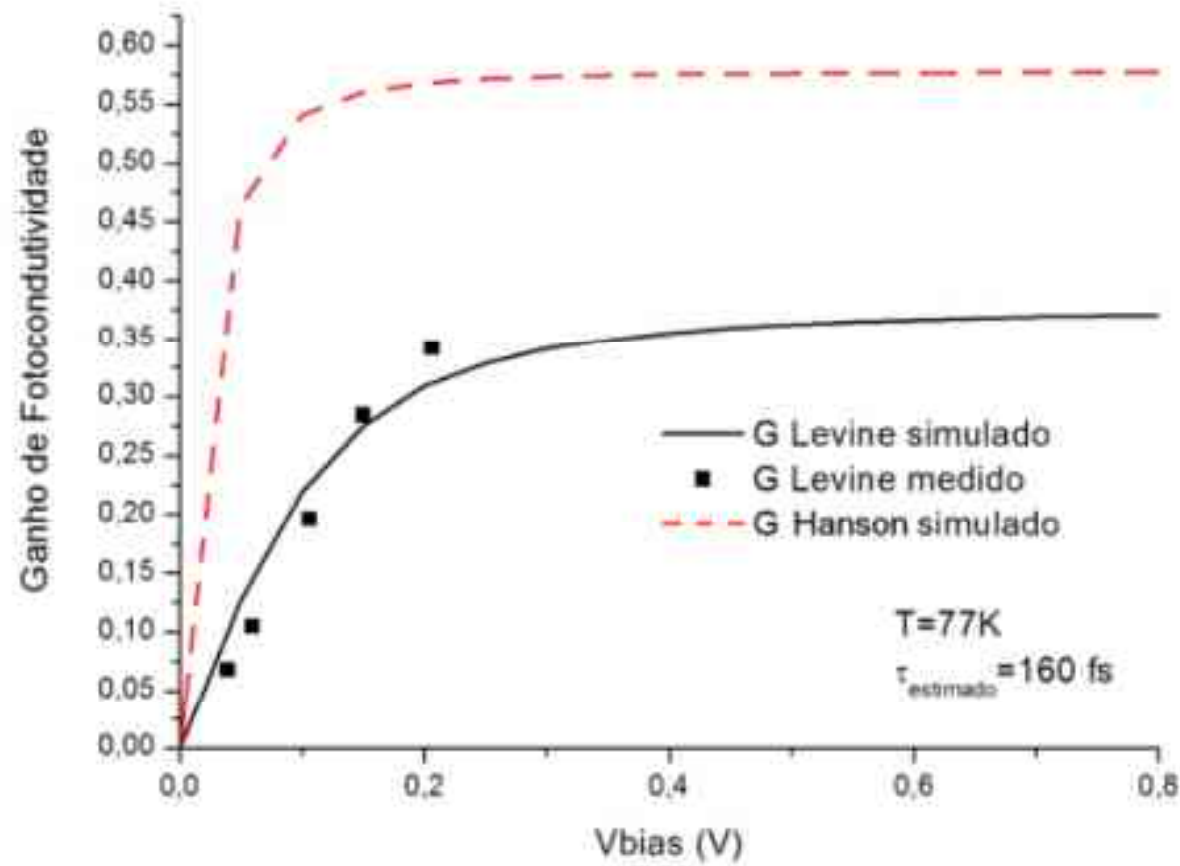
Amostra B - Levine



Espectro de absorção

Simulações e resultados

$$G = \frac{\tau}{L/v(F)} \quad (3)$$



Ganho de fotocondutividade

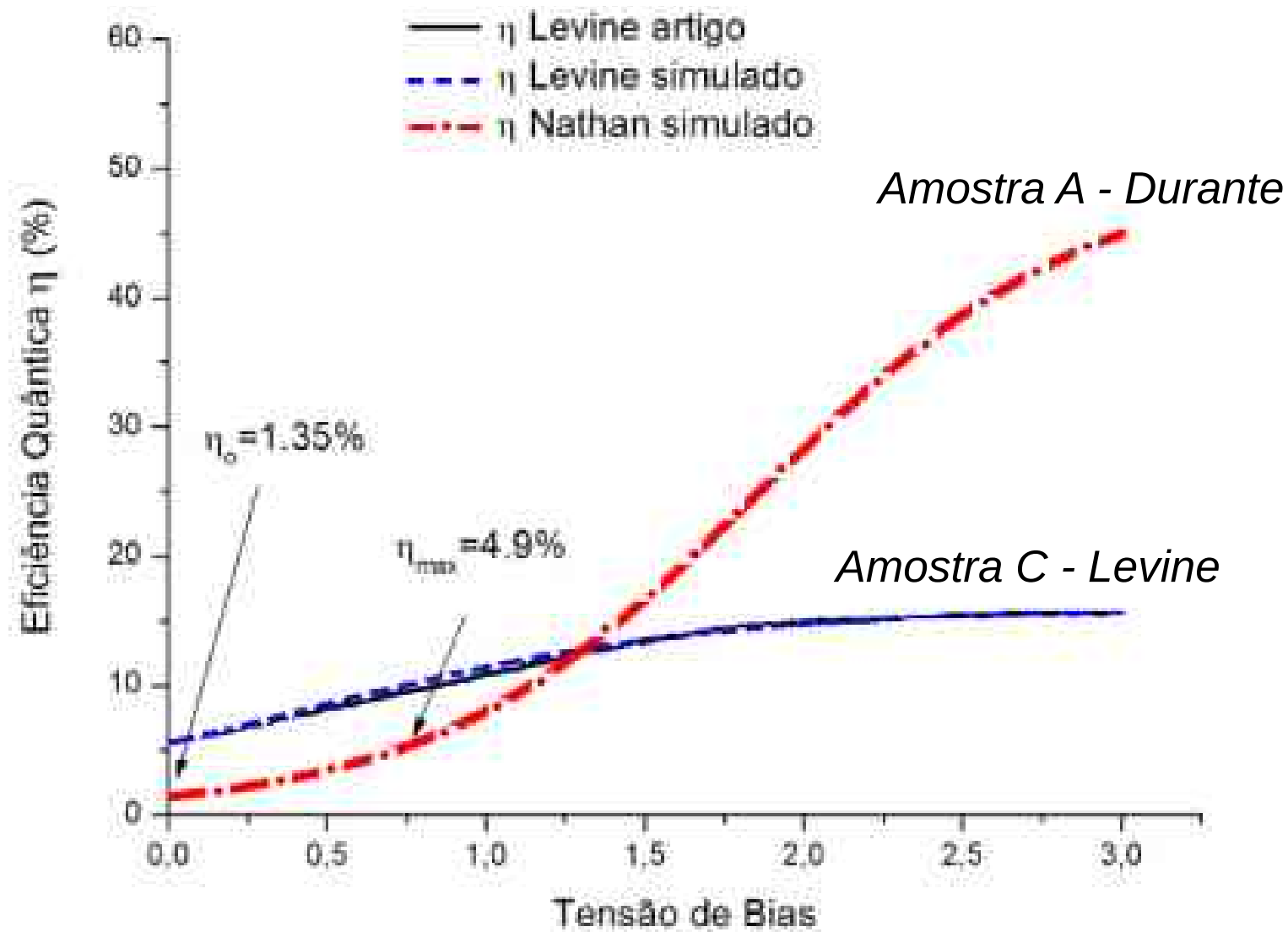
$$\frac{\tau_e}{\tau_r}(V) = \left(\frac{\tau_e}{\tau_r} \right)_o e^{-\frac{V}{V_p}} \quad (7)$$

$$\eta_a = (1 - e^{-2\alpha_p \cdot l}) \quad (5)$$

$$p_e(V) = \left(1 + \frac{\tau_e}{\tau_r}(V) \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\eta = \eta_a \cdot p_e(V) \quad (4)$$

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-[7]) e outro variáveis com a temperatura (T) e a composição do Alumínio no ternário (x) - (Institute of Microelectronic Site - [11] e [12])***

Modelo da Corrente de Escuro

$$I_D(F) = \frac{e \cdot v_{drift} \cdot A m_w^*}{\pi \hbar^2 L} \int_{E_1}^{\infty} f^{FD}(E) T(E, F) dE \quad (20)$$

$$v_{drift} = \frac{\mu_n F}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_n F}{v_s} \right)^2}} \quad (25)$$

$$f^{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}} \quad (21)$$

Fator de Corrente de Tunelamento

$$T(E, F) = \exp \left(- \frac{4L_b}{3eV} \left(\frac{2m^*}{\hbar} \right)^{\frac{1}{2}} \left[(V_o - E)^{\frac{3}{2}} - (V_o - E - eV)^{\frac{3}{2}} \right] \right) \quad E_o < E < V_o - eV \quad (22)$$

$$T(E, F) = \exp \left(- \frac{4L_b}{3eV} \left(\frac{2m^*}{\hbar} \right)^{\frac{1}{2}} (V_o - E)^{\frac{3}{2}} \right), \quad V_o - eV < E < V_o \quad (23)$$

$$T(E, F) = 1 \quad E > V_o \quad (24)$$

Modelo ref.[13] – Andrews e Miller

Simulações e resultados

Massa efetiva ponderada do elétron no detector

Binários

$$m^*_{(GaAs)} = 0.067m_o \quad (8)$$

$$m^*_{(AlAs)} = 0.15m_o \quad (9)$$

Ternário

$$m^*_{(AlGaAs)} = \frac{1}{\frac{x}{m^*_{(GaAs)}} + \frac{1-x}{m^*_{(AlAs)}}} \quad (10)$$

$$m^* = \frac{6m^*_{(AlGaAs)} + m^*_{(GaAs)}}{7} \quad (11)$$

Modelo ref.[10] – Fu, Y. and Willander. M.

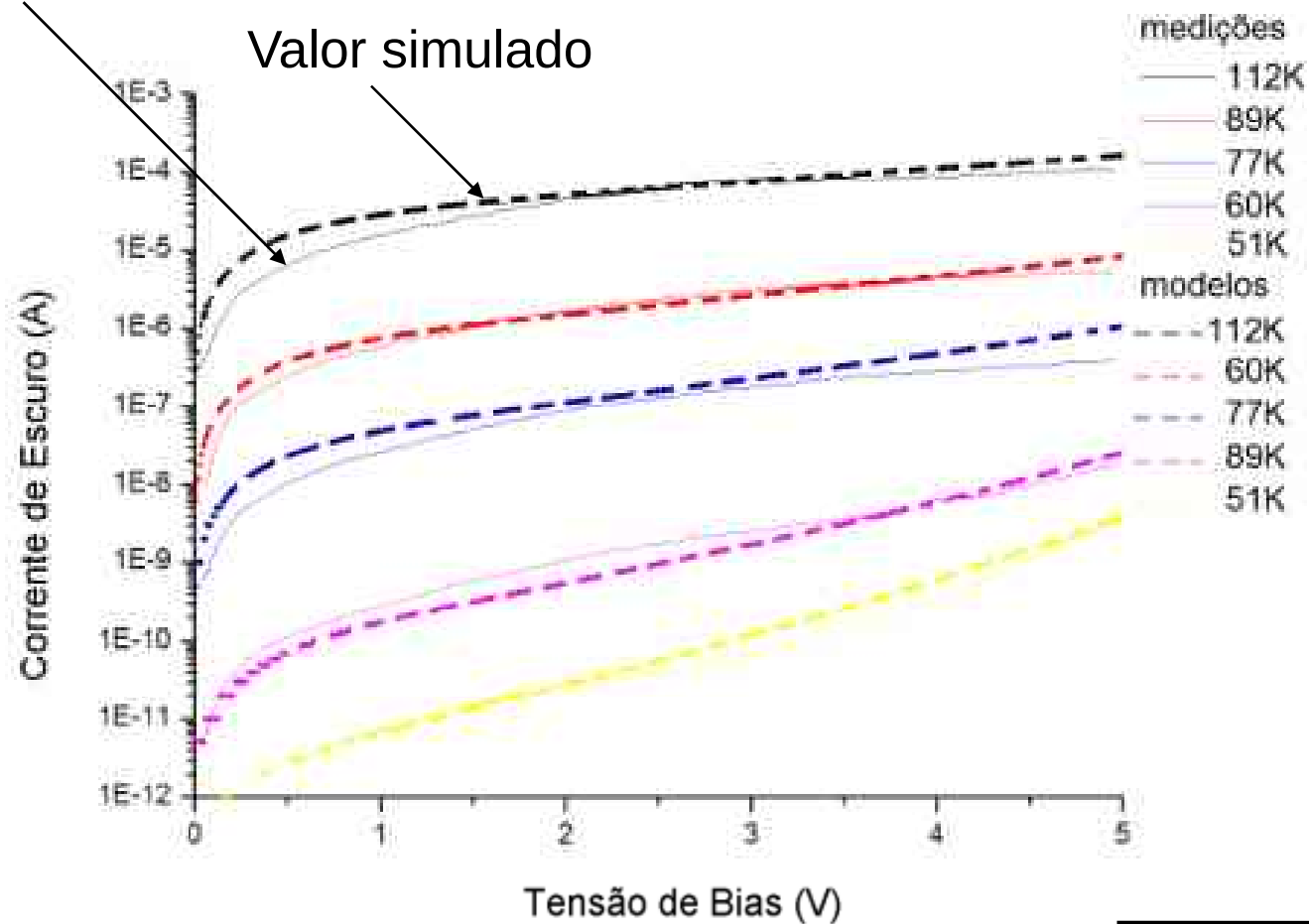
Simulações e resultados

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

Valor simulado



Corrente de escuro

Simulações e resultados

Mobilidade do Elétron Ponderada Variável com T e x

Binários

$$\mu_{GaAs} = 8500.10^{-4} \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.2} \quad (12)$$

$$\mu_{AlAs} = 250.10^{-4} \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.1} \quad (13)$$

Ternário

$$\mu_{AlGaAs} = \frac{1}{\frac{1-x}{\mu_{GaAs}} + \frac{x}{\mu_{AlAs}} + \frac{x(1-x)}{180.10^{-4}}} \quad (14)$$

$$\mu = \frac{6\mu_{AlGaAs} + \mu_{GaAs}}{7} \quad (15)$$

Modelo ref.[11] – Institute of Microelectronic's site

Simulações e resultados

Velocidade de Saturação do Élétron ponderada Variável com T e x

Binários

$$vsat_{GaAs} = \frac{0.72 \cdot 10^5}{1 - 0.56 + 0.56 \left(\frac{T}{300} \right)} \quad (16)$$

$$vsat_{AlAs} = \frac{0.85 \cdot 10^5}{1 - 0.55 + 0.55 \left(\frac{T}{300} \right)} \quad (17)$$

Ternário

$$vsat_{AlGaAs} = (1 - x)vsat_{GaAs} + xvsat_{AlAs} + x(1 - x)(-0.0512 \cdot 10^5) \quad (18)$$

$$vsat = \frac{(6vsat_{AlGaAs} + vsat_{GaAs})}{7} \quad (19)$$

Modelo ref.[12] – Institute of Microelectronic's site

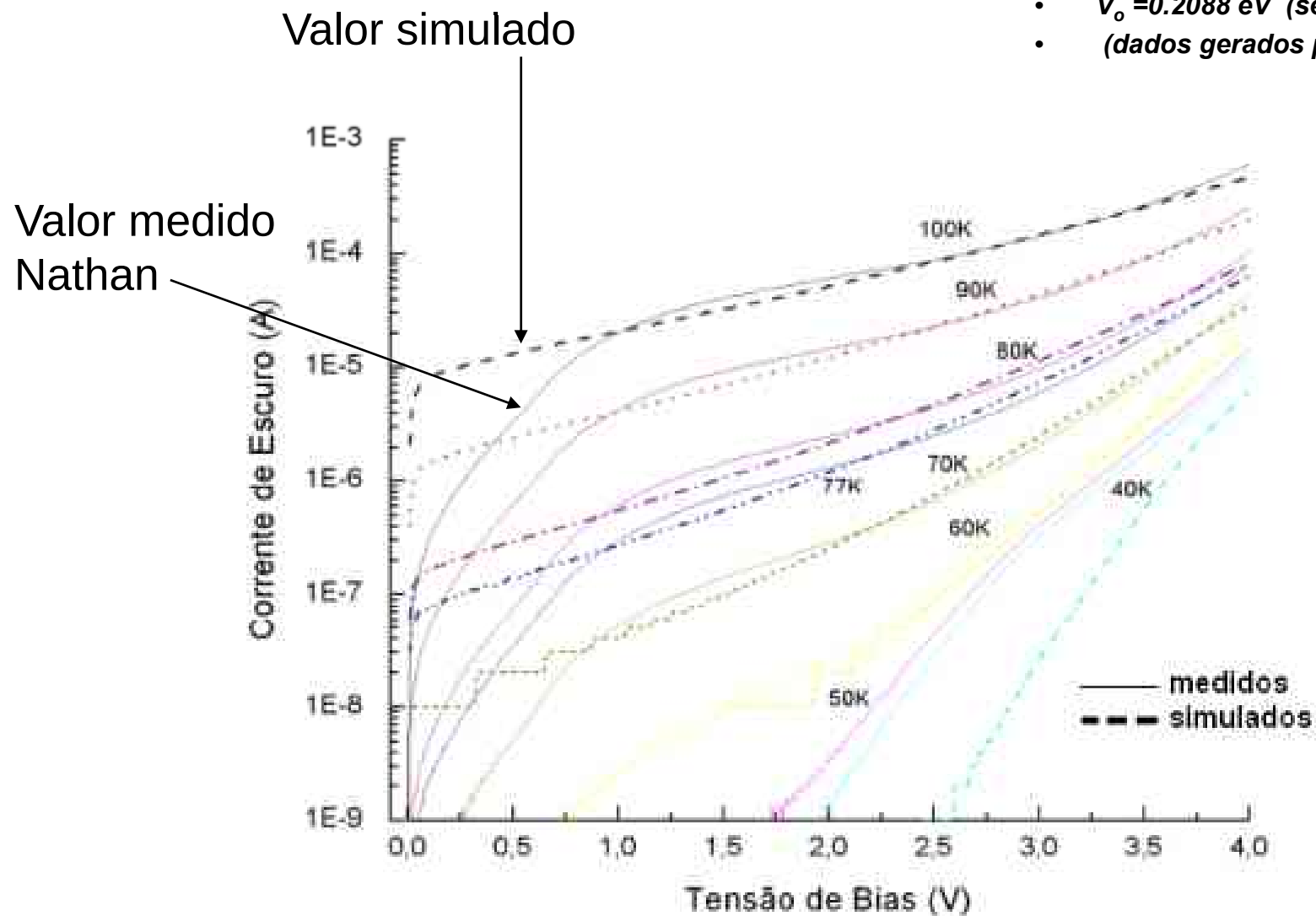
Simulações e resultados

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]

$$I_p(F) \approx \frac{2q\Phi_o}{\hbar\omega} \alpha L_w \left(\sum_{n=1}^N e^{-\frac{nL}{v(F)\tau}} \right) \quad (26)$$

$$G = \sum_{n=1}^N e^{-\frac{nL}{v(F)\tau}} \quad (27)$$

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

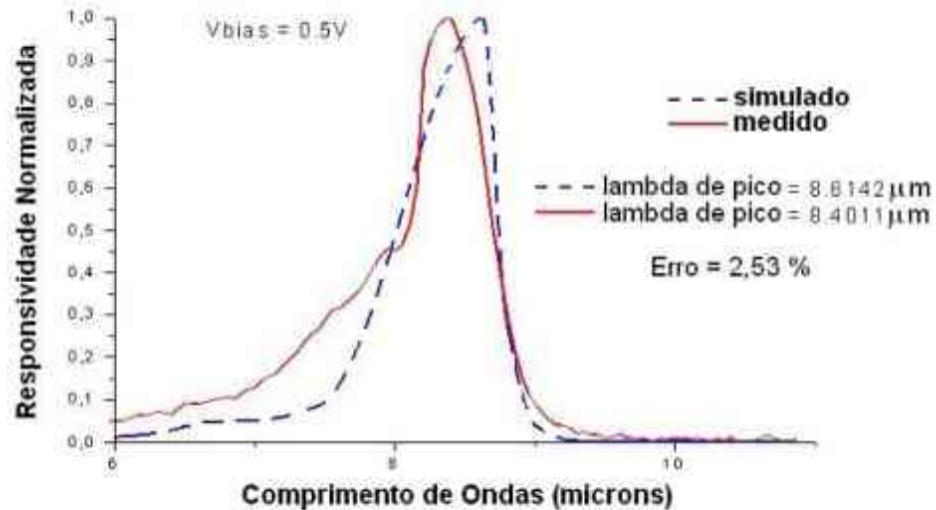
$$R(F) = \frac{I_p(F)}{\Phi_o} \quad (29)$$

$$R_p(F) \approx \frac{2q}{\hbar\omega} \alpha L_w G \quad (30)$$

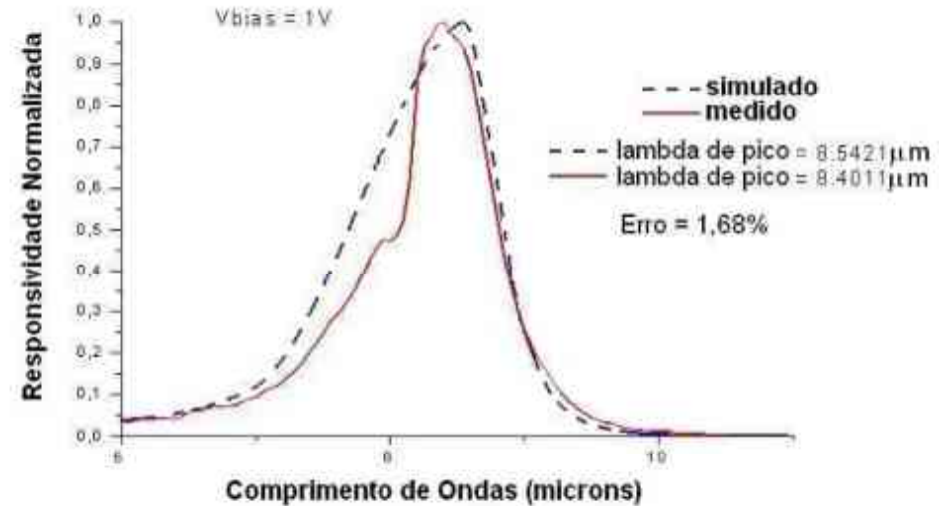
Responsividade

Simulações e resultados

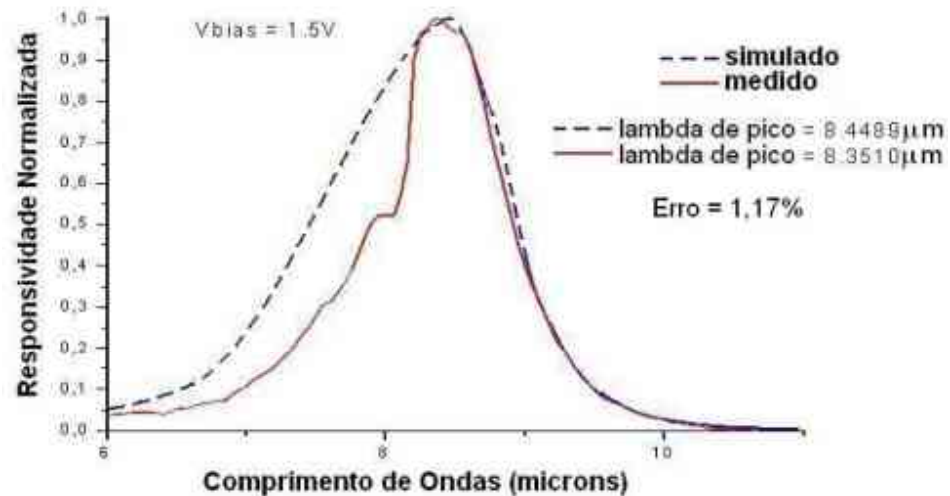
$V_{bias} = 0,5 \text{ V}$



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



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



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.

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, mas que precisa ser aperfeiçoado devido aos resultados absolutos, pelo mesmo motivo do espectro de absorção.

Roteiro

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

Conclusão

- ***O objetivo de estudar a tecnologia de poços quânticos, gerando modelos matemáticos das principais figuras de mérito, 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.***
- ***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 .***

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

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

"A estratégia é a ciência do emprego do tempo e do espaço. Sou menos avaro com o espaço do que com o tempo. O espaço pode ser resgatado. O tempo perdido, jamais." - (Napoleão Bonaparte)



*"Nunca fique implorando por aquilo que você tem o poder de obter."
(Miguel de Cervantes)*