
REVISTA
**PESQUISA
NAVAL**

NÚMERO 28 - 2016



DIRETORIA-GERAL DE DESENVOLVIMENTO NUCLEAR
E TECNOLÓGICO DA MARINHA (DGDNTM)

REVISTA

PESQUISA NAVAL

NÚMERO 28 - 2016

REVISTA
**PESQUISA
NAVAL**

A Revista Pesquisa Naval tem como missão proporcionar à comunidade científica um canal formal de comunicação e de disseminação da produção técnico-científica nacional, por meio da publicação de artigos originais que sejam resultados de pesquisas científicas e que contribuam para o avanço do conhecimento nas áreas de interesse da MB. Os artigos aqui publicados não refletem a posição ou a doutrina da Marinha e são da responsabilidade dos seus autores.

PATROCÍNIO

Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha - DGDNTM

EDITOR-CHEFE

Almirante de Esquadra Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior
Diretor-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha

EDITORES ADJUNTOS

C Alte Alfredo Martins Muradas

Diretor do Centro de Análises de Sistemas Navais - CASNAV

C Alte Marcos Lourenço de Almeida

Diretor do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - IEAPM

C Alte (EN) André Luis Ferreira Marques

Diretor do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTMSF

C Alte (EN) Luiz Carlos Delgado

Diretor do Instituto de Pesquisas da Marinha - IPqM

COMISSÃO EDITORIAL

Adriano Joaquim de Oliveira Cruz - UFRJ - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnio - UFPA - Belém/PA/Brasil
Aletéia Patrícia Favacho de Araújo - UNB - Brasília/DF/Brasil
André Andrade Longaray - FURG - Rio Grande/RS/Brasil
Andre Luiz Lins de Aquino - UFAL - Maceió/AL/Brasil
Cintia de Moraes Borba - FIOCRUZ - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Genaina Nunes Rodrigues - UNB - Brasília/DF/Brasil
Giovane Quadrelli - UCP - Petrópolis/RJ/Brasil
Gilson Brito Alves de Lima - UFF - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Jací Maria Bilhalva Saraiva - CENSIPAM - Brasília/DF/Brasil
José Maria Parente de Oliveira - ITA - São José dos Campos /SP/Brasil
José Mario De Martino - FEEC/UNICAMP - Campinas/SP/Brasil
Jose Manoel Seixas - UFRJ - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Luciano Zogbi Dias - FURG - Rio Grande/RS/Brasil

CONSELHO EDITORIAL

CMG Antônio Capistrano de Freitas Filho

CMG José Fernando De Negri

CF Benjamin Dante Rodrigues Duarte Lima

CC (EN) Elaine Rodino da Silva

2º SG-OR Rogério Augusto dos Santos

3º SG-ET Renato Ellyson Oliveira Cavalcante

EDIÇÃO

Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha - DGDNTM

www.marinha.mil.br/dgdntm/revista

PRODUÇÃO EDITORIAL

Zeppelini Publishers / Instituto Filantropia

www.zeppelini.com.br

Maria Eveline de Castro Pereira - FIOCRUZ - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Marcos Evandro Cintra - UFERSA - Mossoró/RN/Brasil
Marcelo Sperle Dias - UERJ - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Mirian Enriqueta Bracco - UERJ - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Natanael Nunes de Moura - UFRJ - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Newton Narciso Pereira - USP - São Paulo/SP/Brasil
Nivaldo Silveira Ferreira - UENF - Campos dos Goytacazes /RJ/Brasil
Paulo Sérgio Soares Guimarães - UFMG - Belo Horizonte /MG/Brasil
Raul Francé Monteiro - PUC-Goiás - Goiânia/GO/Brasil
Ricardo Coutinho - IEAPM - Rio de Janeiro/RJ/Brasil
Thiago Pontin Tancredi - UFSC - Florianópolis /SC/Brasil
Vivian Resende - UFMG - Belo Horizonte/MG/Brasil
Walter Roberto Hernández Vergara - UFGD - Dourados /MS/Brasil

A REVISTA PESQUISA NAVAL É PATROCINADA POR

FUNDAÇÃO CONRADO WESSEL
FCW

Revista Pesquisa Naval / Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha
v. 1, n. 1, 1988 - Brasília - DF - Brasil - Marinha do Brasil

Anual

Título abreviado: Pesq. Nav.

ISSN Impresso 1414-8595 /

ISSN Eletrônico 2179-0655

1. Marinha - Periódico - Pesquisa Científica. Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha.

CDU 001.891.623/.9
CDD 623.807.2

1 APRESENTAÇÃO

Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior

AMBIENTE OPERACIONAL

2 MODELO DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO PARA OPERAÇÕES COM AERONAVES EMBARCADAS: UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO

A risk classification model for organic aircraft operations: a multiple criteria approach
Luiz Fernando do Nascimento, Mischel Carmen Neyra Belderrain

13 O GERENCIAMENTO DO RISCO OPERACIONAL APLICADO AO DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO DA AMAZÔNIA AZUL

The operational risk management applied to the scientific development of "The Blue Amazon" - Amazônia Azul
Guilherme Pires Black Pereira

ARQUITETURA NAVAL E PLATAFORMA

21 INVESTIGAÇÃO SOBRE A RESPOSTA ESTRUTURAL, INDUZIDA PELA BATIDA DE PROA EM EMBARCAÇÃO MONOCASCO DE SEMIPLANEIO, POR MEIO DE MODELAGEM POR SUBESTRUTURAÇÃO

Investigation on structural response, induced by slamming effect in a monohull semidisplacement ship by means of substructured modeling
Fabio da Rocha Alonso, Waldir Terra Pinto

DESEMPENHO HUMANO E SAÚDE

34 ACIDENTES COM TRANSPORTES HIDROVIÁRIOS EM OCASIÃO DE EXTREMOS METEOROLÓGICOS

Accidents with waterway transports due to extreme weather conditions
Suanne Honorina Martins dos Santos, Maria Isabel Vitorino, Jefferson Inayan de Oliveira Souto, Edson José Paulino da Rocha

PROCESSOS DECISÓRIOS

45 DISCRIMINAÇÃO LITOLÓGICA POR ATRIBUTOS SÍSMICOS ELÁSTICOS: UMA ABORDAGEM POR SISTEMAS FUZZY-GENÉTICOS

Lithology discrimination by seismic elastic patterns: a genetic fuzzy systems approach
Eric da Silva Praxedes, Adriano Soares Koshiyama, Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco, Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, Ricardo Tanscheit

SENSORES, GUERRA ELETRÔNICA E GUERRA ACÚSTICA

57 COMPARAÇÃO ENTRE A ESTIMAÇÃO TEÓRICA E AS MEDIDAS DAS PRINCIPAIS FIGURAS DE MÉRITO DE FOTODETECTORES INFRAVERMELHOS A POÇOS QUÂNTICOS

Comparison between the theoretical estimation and the measurements of the main figures of merit of quantum well infrared photodetectors
Ali Kamel Issmael Junior, Fábio Durante Pereira Alves, Ricardo Augusto Tavares Santos

71 DETECÇÃO CEGA E ASSISTIDA DE SINAIS EM SISTEMAS UWB BASEADOS NO PADRÃO IEEE 802.15.4A

Blind and assisted signal detection for UWB systems based on the IEEE 802.15.4a standard

Aline de Oliveira Ferreira, Cesar Augusto Medina Sotomayor, Fabian David Backx, Raimundo Sampaio Neto

82 SONAR PASSIVO NACIONAL: AVANÇOS E DEMONSTRAÇÃO DE TECNOLOGIA

Brazilian Passive Sonar: advances and technology showcase

Fabricio de Abreu Bozzi, William Soares Filho, Fernando de Souza Pereira Monteiro, Carlos Alfredo Órfão Martins, Gustavo Augusto Mascarenhas Goltz, Orlando de Jesus Ribeiro Afonso, Cleide Vital da Silva Rodrigues, Fernando Luiz de Magalhães, Leonardo Martins Barreira

TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E DE COMUNICAÇÕES

93 UMA ARQUITETURA PARA A GESTÃO DOS PROJETOS DE ENGENHARIA DE SOFTWARE VISANDO À INTEGRAÇÃO NAS FORÇAS ARMADAS

An architecture to manage software engineering projects aimed at integration within the Brazilian Armed Forces

Geraldo da Silva Souza, Rodrigo Abrunhosa Collazo, Jones de Oliveira Avelino, Carlos Eduardo Barbosa

APRESENTAÇÃO

A Marinha, ao longo do tempo, tem sido protagonista na área da Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I), com resultados que extrapolam a Força Naval, gerando conquistas e benefícios para o País. Ressalta-se o pioneirismo do Almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva, Patrono de CT&I da Marinha e cientista brasileiro, que idealizou e implementou, nos anos 1950, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), tendo sido o seu primeiro Presidente.

A Força Naval, sempre buscando seu aprimoramento e tendo como farol o legado conquistado na área de CT&I até os dias de hoje, mudou sua estrutura organizacional, alterando a denominação da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha — SecCTM — para Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha — DGDNTM. À Diretoria-Geral cabe planejar, organizar, dirigir e controlar todas as atividades de CT&I da Marinha, incluindo os relevantes Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) e Programa Nuclear da Marinha (PNM).

Esses programas, que permitirão ao Brasil obter por projeto e construção o seu primeiro submarino com propulsão nuclear, têm mostrado que os benefícios advindos dos investimentos da Força em CT&I continuam extrapolando a área exclusiva do Poder Naval. Como exemplo de beneficiários, podemos citar a área de geração de energia elétrica e a área da saúde, pois, em parceria com as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), estamos trabalhando na busca da autonomia brasileira na produção do combustível nuclear para as centrais nucleares de Angra dos Reis (RJ) e no projeto de implantação

do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), que produzirá radiofármacos.

A demanda por novas tecnologias levou a Marinha a estabelecer novas Parcerias Estratégicas com o meio acadêmico e o empresarial, bem como com outras instituições governamentais, como orienta o conceito indutor da inovação conhecido como Tríplice Hélice. Alguns instrumentos jurídicos de cooperação já foram firmados e a cooperação está sendo ampliada com atividades de conhecimento mútuo, como *workshops* e simpósios, com diversas instituições em diferentes regiões do Brasil.

Nesse contexto, a Revista de Pesquisa Naval vem, desde sua primeira edição, em 1988, dando relevante contribuição para a disseminação das atividades de CT&I da Marinha, sendo, portanto, importante instrumento de interação com o meio acadêmico, empresarial e demais órgãos governamentais. No momento em que apresento uma nova coleção de artigos científicos, aproveito para saudar a todos que, de alguma forma, colaboraram para alcançarmos esse patamar de desenvolvimento científico e tecnológico. Bravo Zulu!

Que tenham uma agradável leitura!



BENTO COSTA LIMA LEITE DE ALBUQUERQUE JUNIOR
Almirante de Esquadra
Diretor-Geral de Desenvolvimento Nuclear
e Tecnológico da Marinha

COMPARAÇÃO ENTRE A ESTIMAÇÃO TEÓRICA E AS MEDIDAS DAS PRINCIPAIS FIGURAS DE MÉRITO DE FOTODETECTORES INFRAVERMELHOS A POÇOS QUÂNTICOS

Comparison between the theoretical estimation and the measurements of the main figures of merit of quantum well infrared photodetectors

Ali Kamel Issmael Junior¹, Fábio Durante Pereira Alves²,
Ricardo Augusto Tavares Santos³

Resumo: Este artigo traz uma discussão da comparação entre estimação teórica e medidas das principais figuras de mérito de fotodetectores infravermelhos a poços quânticos (QWIP). Modelos matemáticos do coeficiente de absorção, da corrente de escuro e da responsividade, disponíveis na literatura especializada, são analisados, comparados e implementados utilizando a ferramenta computacional MatLab[®]. Os resultados das simulações são comparados com dados experimentais publicados em outros estudos e indicam que os modelos, convenientemente adaptados, apresentam grande potencialidade para serem utilizados em projetos de dispositivos reais.

Palavras-chaves: Fotodetectores. Poços Quânticos. Caracterização. Aplicações Militares.

Abstract: This paper presents a comparison between the theoretical estimation and the measures of the main figures of merit of quantum well infrared photodetectors (QWIP). Mathematical models of the main figures of merit such as absorption coefficient, dark current, and responsivity, available in the specialized literature, are analyzed, compared, and implemented in MatLab[®]. The results of numerical simulations are compared with experimental data published in other studies and show that the models which are properly adapted have great potential for use in projects of real devices.

Keywords: Photodetectors. Quantum Wells. Characterization. Military Applications.

1. INTRODUÇÃO

A fotodeteção é, hoje, uma realidade tecnológica que ampliou as possibilidades em diversas áreas do conhecimento. Uma delas é justamente a de Defesa, pois a caracterização

de objetos ou cenas por meio de fotodetectores com grande sensibilidade e seletividade em amplas faixas do espectro infravermelho permite que sistemas, como o de guiamento de mísseis, obtenham maior precisão na seleção e no acerto de um alvo.

1. Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Eletrônicos pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (1999), Militar do Corpo de Engenheiros da Marinha (desde 2000) e Especialista em Análise do Ambiente Eletromagnético pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2007). Atualmente é Ajudante da Gerência de Desenvolvimento do Sistema de Combate dos S-BR, na Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: ali.kamel@marinha.mil.br e alikamel@ig.com.br

2. Bacharel em Ciências Aeronáuticas pela Academia da Força Aérea (1986), Graduado em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (1997), Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (1998), Mestrado em *Electrical Engineering* pela *Naval Postgraduate School - USA* (2005), *Electrical engineer degree* pela *Naval Postgraduate School - USA* (2005), Doutorado em Física pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2008) e Pós-Doutorado na área de Sensores na faixa de Terahertz, na *Naval Postgraduate School USA* (2011). Atualmente é Coronel Aviador da reserva da Força Aérea Brasileira, Professor Colaborador (voluntário) da Divisão de Engenharia Eletrônica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica e Pesquisador Associado ao Departamento de Física da *Naval Postgraduate School - São José dos Campos, SP - Brasil*. E-mail: durante@ita.br

3. Graduou-se na Academia da Força Aérea em Ciências Aeronáuticas e Piloto Militar em 1993. Em 2001, realizou o Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, concluiu o Programa de Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação (2004) e o Programa de Doutorado (2009), ambos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Atualmente, é o Subdiretor de Avaliação Operacional e de Pesquisa e Desenvolvimento do Núcleo do Instituto de Aplicações Operacionais do Comando-Geral de Operações Aéreas - São José dos Campos, SP - Brasil. E-mail: tavares.ricardoaugusto@gmail.com

A radiação infravermelha é proveniente da agitação molecular provocada pelo aumento da temperatura em que se encontram corpos e objetos. Mais precisamente, todos os corpos que se encontram acima do zero absoluto emitem radiação. A Figura 1 (NASA, 2007) mostra a localização da radiação infravermelha dentro do espectro eletromagnético.

A região infravermelha do espectro eletromagnético, dependendo da referência utilizada, pode ser subdividida em quatro faixas: Infravermelho Próximo (NIR – *Near Infrared*), na faixa entre 0.7–3.0 μm ; Infravermelho Médio (MIR – *Mid-wavelength Infrared*), na faixa entre 3.0–6.0 μm ;

Infravermelho Longo (LWIR – *Long-wavelength Infrared*), na faixa entre 6.0–15.0 μm ; e Infravermelho Muito Longo (VLWIR – *Very Long-wavelength Infrared*), com valores de comprimento de onda acima de 15.0 μm (ALVES, 2005). Podemos visualizar melhor essas subdivisões a partir da Tabela 1.

A atmosfera, meio onde se efetua a propagação de radiação, é composta por gases e partículas em suspensão distribuídas por diferentes temperaturas e pressões, que ocorrem em função da altitude e da posição geográfica. Os gases e as partículas podem se localizar em seis diferentes camadas distribuídas por meio da variação de altitude. A mais

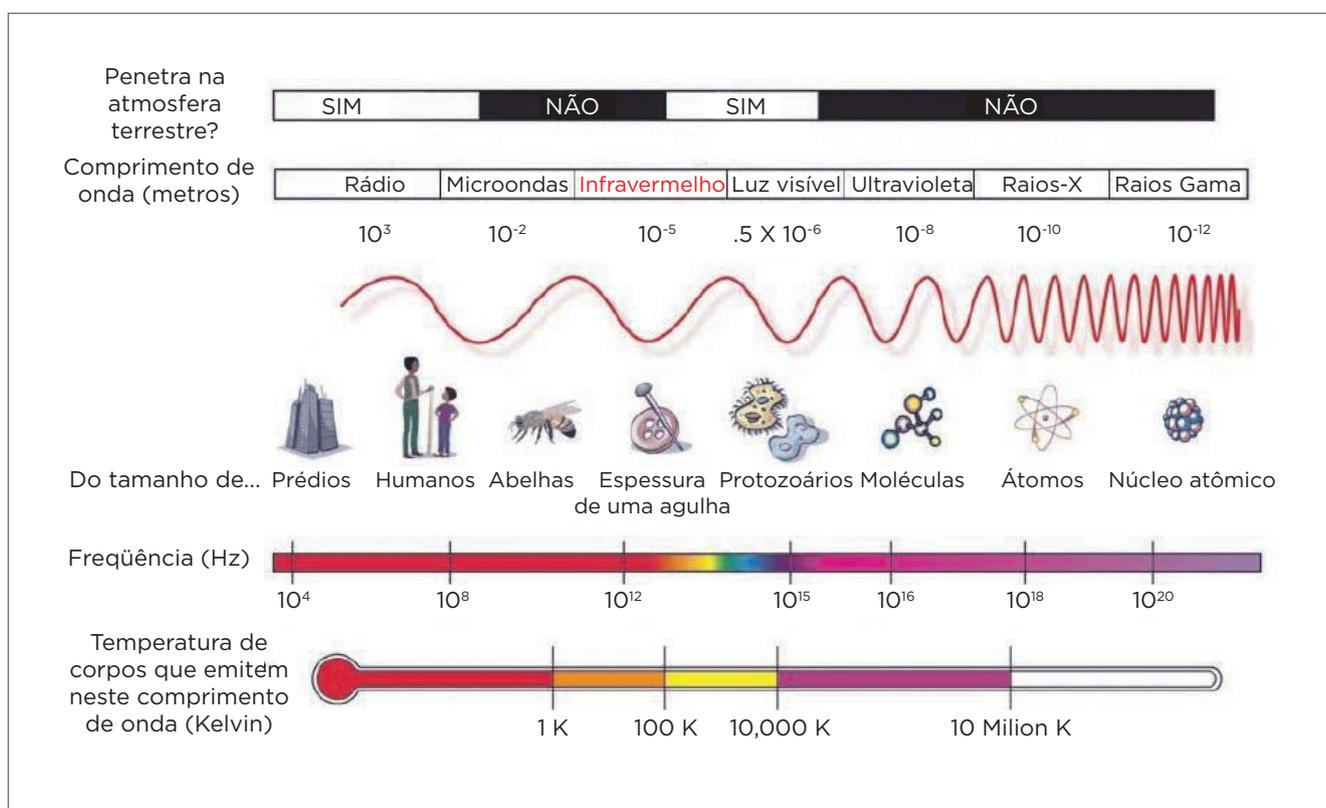


Figura 1. O espectro eletromagnético e a localização da radiação infravermelha (NASA, 2007).

Tabela 1. Subdivisões da faixa de radiação infravermelha (ALVES, 2005).

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

baixa — cenário mais utilizado em aplicações militares — é a troposfera, que se estende do nível do mar até aproximadamente 11 km (SANTOS, 2004), dependendo da estação do ano e da latitude. Nessa camada, a temperatura decresce à medida que a altitude aumenta, em uma razão de 6,5 K/km, podendo, entretanto, ocorrer variações nessa razão que causam efeitos de espalhamento (SANTOS, 2004). A maioria dos atenuadores da radiação infravermelha se encontra nessa camada, tendo como principais componentes a água, o gás carbônico, as nuvens e a fumaça. As outras camadas são a estratosfera, a mesosfera, a ionosfera, a termosfera e a exosfera. Quando se verifica a transmissão do infravermelho por meio da atmosfera, observa-se que há uma absorção seletiva feita pelos gases presentes, um espalhamento provocado pelas partículas em suspensão e, às vezes, uma modulação causada por rápidas mudanças de temperatura e/ou pressão.

O vapor d'água é o grande atenuador da radiação óptica, sendo predominante em altitudes inferiores a 10 km.

A atenuação acima desse nível é desprezível. O dióxido de carbono está presente até 5 km, aproximadamente, e só atenua a radiação infravermelha. Considerando os efeitos atenuadores da atmosfera, os detectores infravermelhos são projetados para responder nas faixas de frequência em que a transmitância de radiação infravermelha da atmosfera é máxima. Podemos verificar na Figura 2 que a transmitância da atmosfera limita a possibilidade de detecção em 3 regiões bem definidas: de 0.7–2.5 μm , de 3.0–5.0 μm e de 8.0–15.0 μm , correspondendo, dessa forma, às faixas NIR, MIR e LWIR, respectivamente (BOSCHETTI, 2015).

Dentro desse contexto, os detectores infravermelhos a poços quânticos (QWIP) tornaram-se uma boa alternativa para modernos sistemas de fotodetecção. No caso de aplicações militares, há uma demanda de detectores com características especiais para serem usados em campos de batalha, em missões que podem envolver reconhecimento de alvos, imageamento de ambientes ou áreas de interesse e até mesmo guiamento de mísseis.

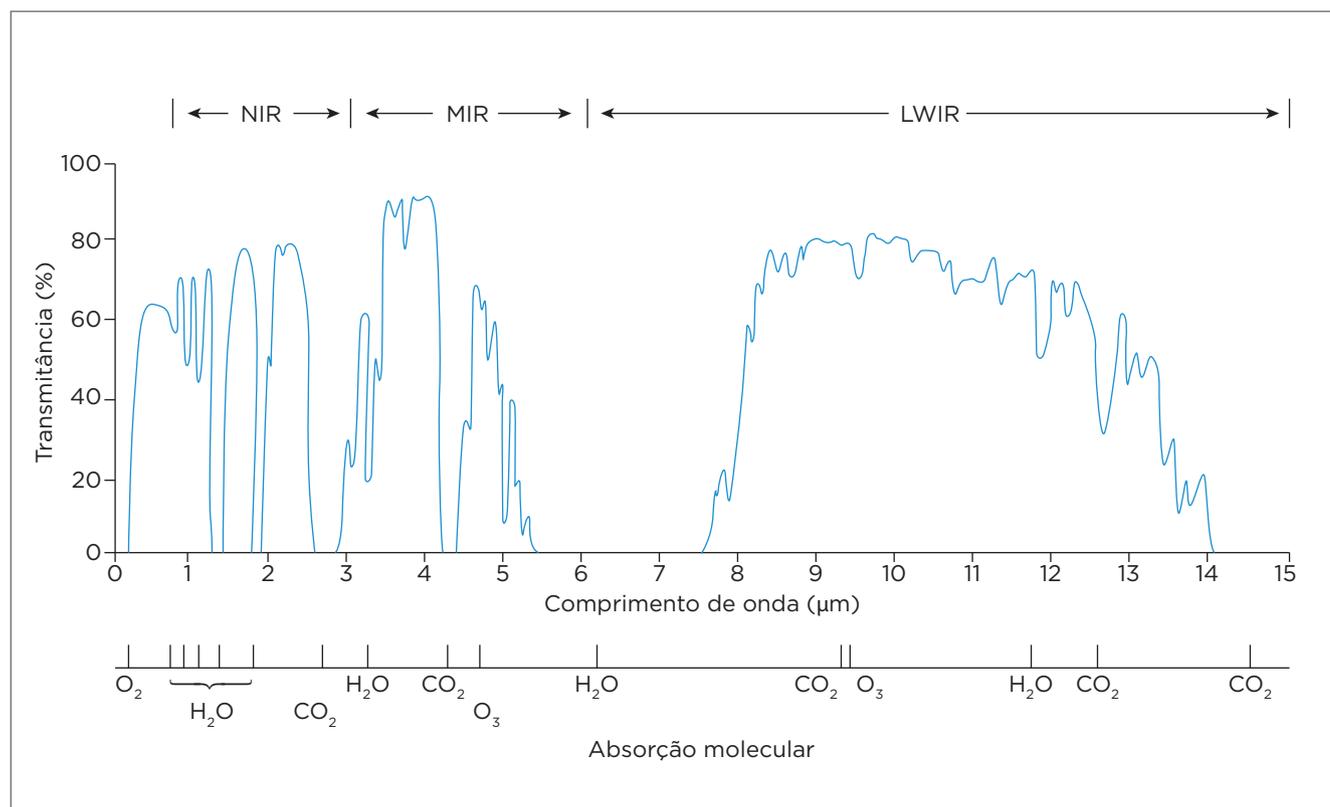


Figura 2. Espectro de transmissão da atmosfera terrestre, nas faixas do infravermelho próximo, médio e longo. O espectro corresponde a uma camada de 1830 m de ar ao nível do mar e com 40% de umidade relativa a 25°C. Na parte de baixo da figura estão indicadas as linhas de absorção de alguns componentes do ar atmosférico, responsáveis pela forma da curva de transmissão (BOSCHETTI, 2015).

Câmeras de QWIP são muito atrativas para essa aplicação devido a suas características de alta seletividade e capacidade de detecção multiespectral, o que permite detecção e identificação por meio do uso de imagens em alta resolução (GUNAPALA et al., 2007; GUNAPALA, 2007; DYER; TIDROW, 1998).

Por conseguirem gerar imagens em uma faixa ampla do espectro infravermelho — 6–20 μm — (GUNAPALA, 2007) com alto poder discriminativo — 640 \times 512 linhas — (GUNAPALA, 2007) em mais de uma banda simultaneamente — a um custo significativamente baixo (GUNAPALA, 2007) —, esses sistemas são uma opção atraente para serem utilizados em armamentos com guiamento infravermelho (DYER; TIDROW 1998). Com o aumento significativo do poder de letalidade desses sistemas bélicos, essa tecnologia se torna um fator gerador de assimetria para as Forças Armadas que os empregam. A Figura 3 apresenta alguns produtos de mercado que já utilizam essa tecnologia.

O conhecimento das características de construção dos QWIP e os seus fatores de avaliação de desempenho subsidiaram tecnicamente futuras aquisições de dispositivos e aumentam as chances de se realizar o projeto, o desenvolvimento e a fabricação no país. Além disso, o estudo das figuras de mérito e o desenvolvimento de ferramentas matemáticas que as simulem aceleram o processo de desenvolvimento, com redução de custos. Tal fato contribui para a independência tecnológica em sistemas de defesa.

Os resultados apresentados neste artigo fazem parte da linha de pesquisa de análise e desenvolvimento de fotodetectores a poços quânticos com capacidade de detecção simultânea em três faixas do infravermelho: NIR, MWIR e LWIR. Este trabalho vem sendo feito em parceria com o Laboratório de Guerra Eletrônica (LabGE) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), com o *Sensor Research Laboratory* (SRL) da *Naval Postgraduate School* (NPS) e o *National Research Council* (NRC) do Canadá. Os resultados, publicados por Alves (2005), Hanson (2006), Alves et al. (2006), Issmael Jr. et al. (2007), Issmael Jr. (2007) e Alves et al. (2008), mostram o grande potencial desses dispositivos para as aplicações militares. Para ser capaz de produzir fotodetectores a poços quânticos, é necessário:

- modelar as estruturas de materiais semicondutores;
- simular e ajustar as figuras de mérito dentro dos requisitos de projeto;
- crescer a estrutura cristalina, caracterizá-la e repetir o processo, ajustando-se os modelos e as técnicas de simulação;
- fabricar os detectores/câmeras; e
- finalmente, realizar a análise de desempenho.

Esse ciclo pode se repetir várias vezes até que as técnicas de projeto e os modelos estejam refinados o suficiente para, dentro de certas características, serem repetitivos.

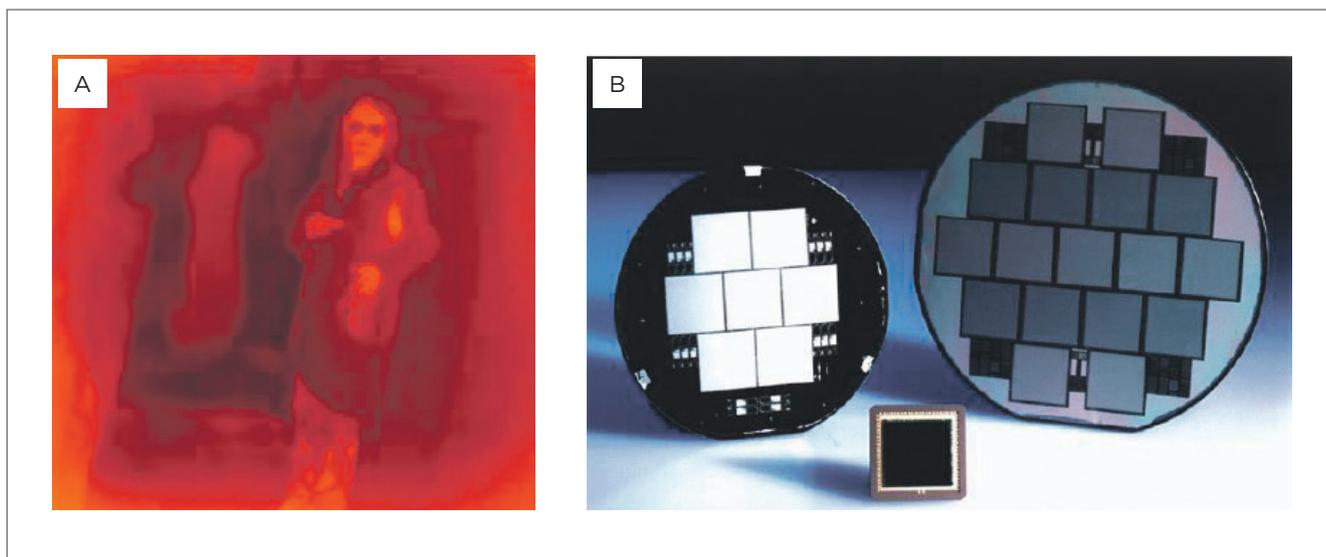


Figura 3. (A) Imagem infravermelha gerada por uma câmera com fotodetectores infravermelhos a poços quânticos (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2006); e (B) matriz de fotodetectores infravermelhos a poços quânticos utilizados para sensoriamento de mísseis balísticos de defesa (MISSILE DEFENSE AGENCE, 2007).

Nesse contexto, limitando-se a poços quânticos sensíveis ao LWIR, este trabalho apresenta a análise de alguns modelos disponíveis na literatura para as principais figuras de mérito, coeficiente de absorção, corrente de escuro e responsividade, mostra os resultados obtidos com as simulações realizadas com o *software* MatLab® — em sua versão R2006b — a partir desses modelos e compara os resultados com vistas ao aprimoramento dos modelos e sua utilização. A importância do uso da ferramenta MatLab® — além do seu excelente desempenho ser largamente comprovado em trabalhos de simulação em Engenharia — é devido ao fato dos trabalhos anteriores deste projeto também terem sido desenvolvidos com ela, não justificando a adaptação para outras ferramentas, o que simplificou bastante a evolução das rotinas de simulação dos trabalhos anteriores para a obtenção dos resultados apresentados neste artigo.

2. METODOLOGIA

A denominação poço quântico vem de poço de potencial, o qual pode ser obtido quando um material semiconductor é “crescido” entre dois outros semicondutores — “sandwichado” —, que possuem um *gap* de energia maior, provocando a formação de níveis quânticos de energia, que confinam portadores a duas dimensões. Nesse sentido, a radiação IR pode ser absorvida causando excitação nos portadores, fazendo-os saírem do estado fundamental para um estado superior. Quando a transição ocorre entre níveis quantizados dentro de uma mesma banda, essa transição é denominada intersubbanda; e quando acontece entre níveis quantizados entre as bandas de valência e condução, é denominada interbanda. A Figura 4 mostra esquematicamente um diagrama de bandas de uma estrutura tipo poço quântico. Conforme pode ser observado nessa figura,

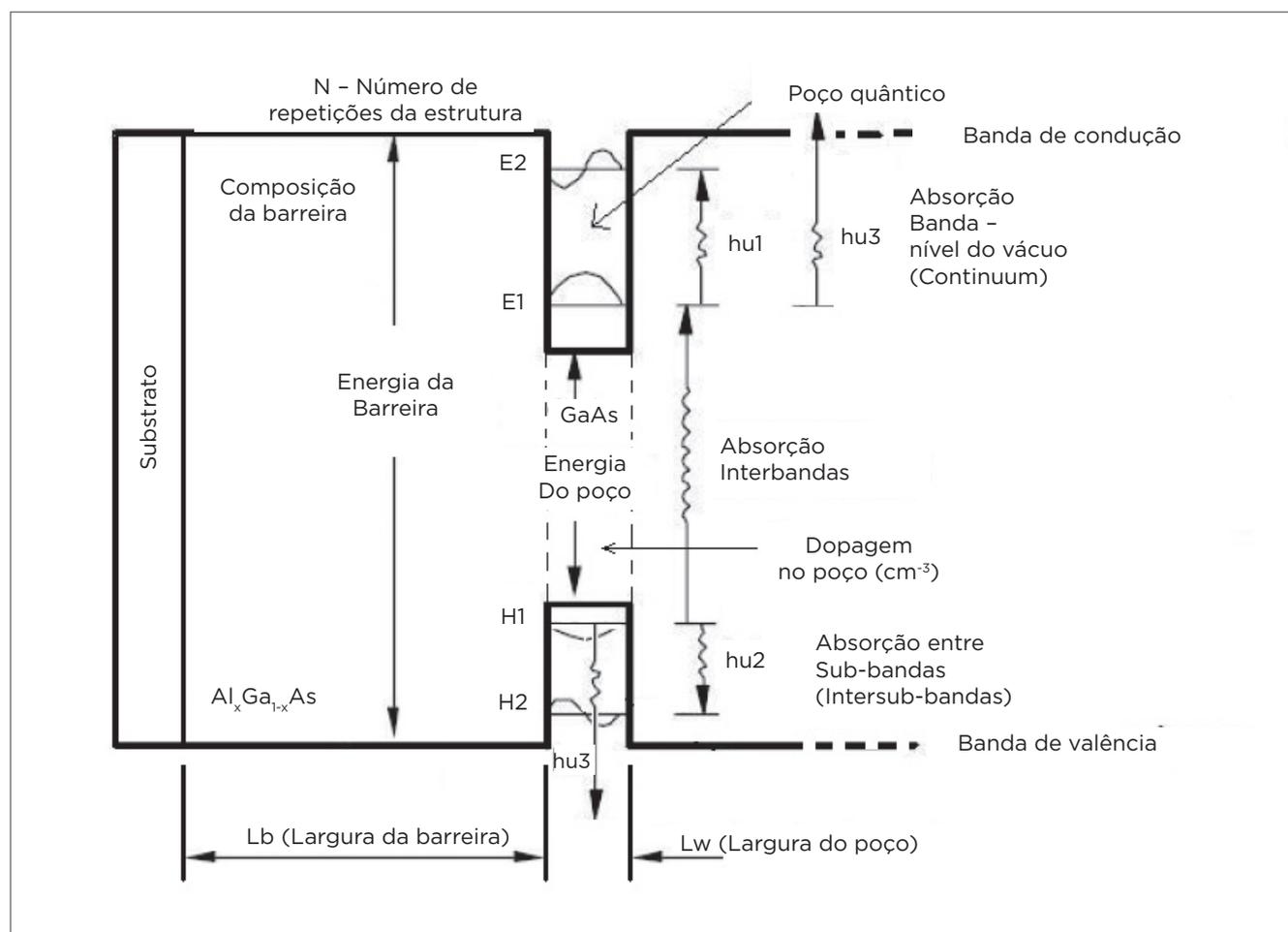


Figura 4. Diagrama de Bandas, as transições entre os níveis de energia e as principais variáveis construtivas de um poço quântico simétrico (ISSMAEL JUNIOR, 2007).

em transições intersubbanda a energia de transição é menor, permitindo detecção na faixa do LWIR — foco deste trabalho.

Selecionando-se o material e controlando sua composição e suas dimensões, o espectro de absorção, bem como as demais figuras de mérito, podem ser estimados. Dessa forma, foram selecionados modelos disponíveis na literatura que pudessem adequadamente descrever os fenômenos quânticos de estruturas como a esquematizada na Figura 4, permitindo o cálculo dos níveis de energia quantizados, bem como os demais parâmetros necessários para caracterizar os

detectores. Foram simuladas estruturas reportadas na literatura para permitir a validação dos modelos que foram utilizados para prever características medidas em laboratório.

A Tabela 2 apresenta os dados das amostras utilizadas nas simulações, todas com poços compostos por GaAs.

Na Figura 5 a seguir, pode-se observar o fotodetector multicamadas e sua polarização, que foi construído (ALVES, 2005) e que é a base do estudo da amostra A.

A Figura 6 (ALVES, 2005) apresenta o diagrama de bandas de energia da amostra A.

Tabela 2. Amostras utilizadas nas simulações.

Amostra	Referência	Largura da barreira (Lb) (ångström)	Largura do poço (Lp) (ångström)	Composição da barreira	Número de repetições	Dopagem do poço (cm ⁻³)
A	(ALVES, 2005) Pág. 62	300	52	Al _{0,26} Ga _{0,74} As	20	0.5.10 ¹⁸
B	(LEVINE, 1993) Págs. R22 e R29 e (GUNAPALA e BANDARA, 1999) Págs. 23 e 34	500	40	Al _{0,26} Ga _{0,74} As	50	1.10 ¹⁸
C	(LEVINE, 1993) Págs. R22 e R29	500	50	Al _{0,26} Ga _{0,74} As	25	0.42.10 ¹⁸
D	(LEVINE, 1993) Pág. R18	305	40	Al _{0,29} Ga _{0,71} As	50	1.4.10 ¹⁸

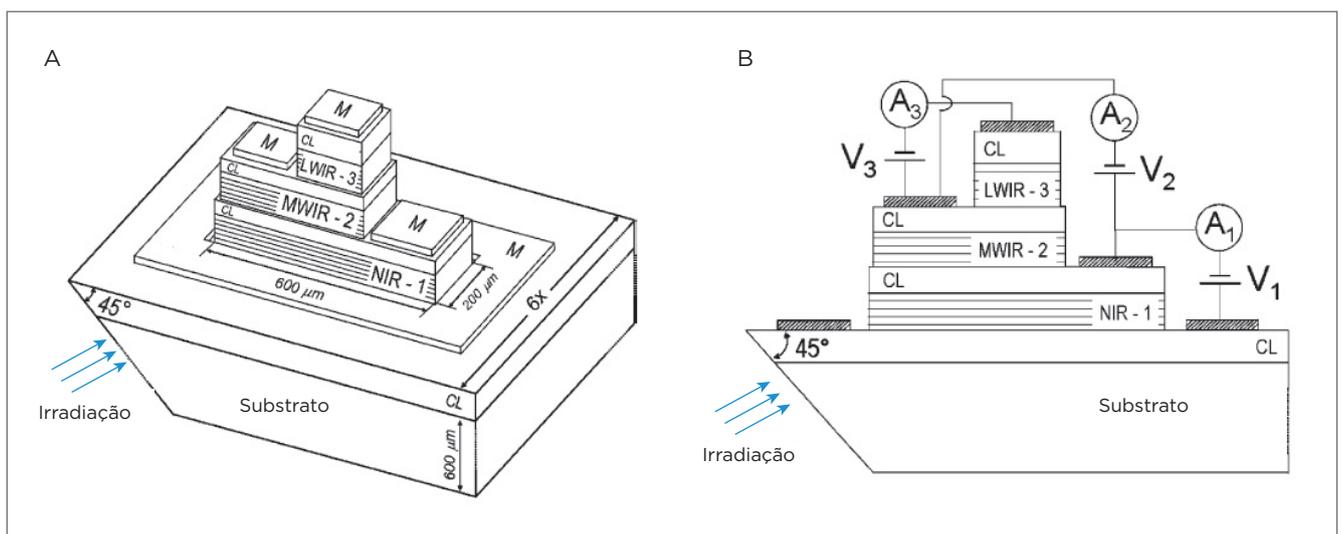


Figura 5. (A) Diagrama tridimensional do dispositivo detector multicamada e (B) vista em corte vertical do dispositivo, enfatizando a configuração construtiva independente de cada camada associada a uma faixa de detecção do espectro infravermelho (ALVES, 2005).

Na Figura 7 (ALVES, 2005), temos a imagem do fotodetector da amostra A.

A Figura 8 traz o diagrama de bandas das amostras listadas na Tabela 2.

Inicialmente calcula-se o perfil de potencial das estruturas, considerando que as dimensões no eixo de crescimento z são inúmeras ordens de grandeza menores que no plano $x-y$, restringindo o confinamento unidimensional dos portadores — elétrons na banda de condução e buracos na banda de valência. O potencial é determinado basicamente pelo *offset* das bandas na *interface*, pelo campo elétrico externo aplicado na estrutura e pela distribuição de cargas. O primeiro é obtido de parâmetros relatados na literatura e de ajustes empíricos obtidos em laboratório. O segundo é conhecido e controlado pelo usuário do dispositivo. A terceira demanda o conhecimento dos níveis de energia confinados, bem como suas respectivas funções de onda, exigindo que as equações de Schrodinger-Poisson sejam resolvidas de forma autoconsistente (ALVES, 2005).

Para resolver as equações diferenciais e obter os autovalores e as autofunções, Alves (2005) utilizou o método de *Shooting*

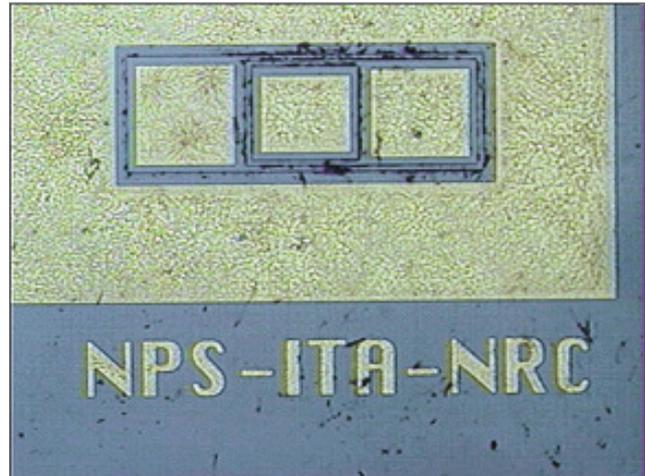


Figura 7. Imagem do fotodetector da amostra A (ALVES, 2005).

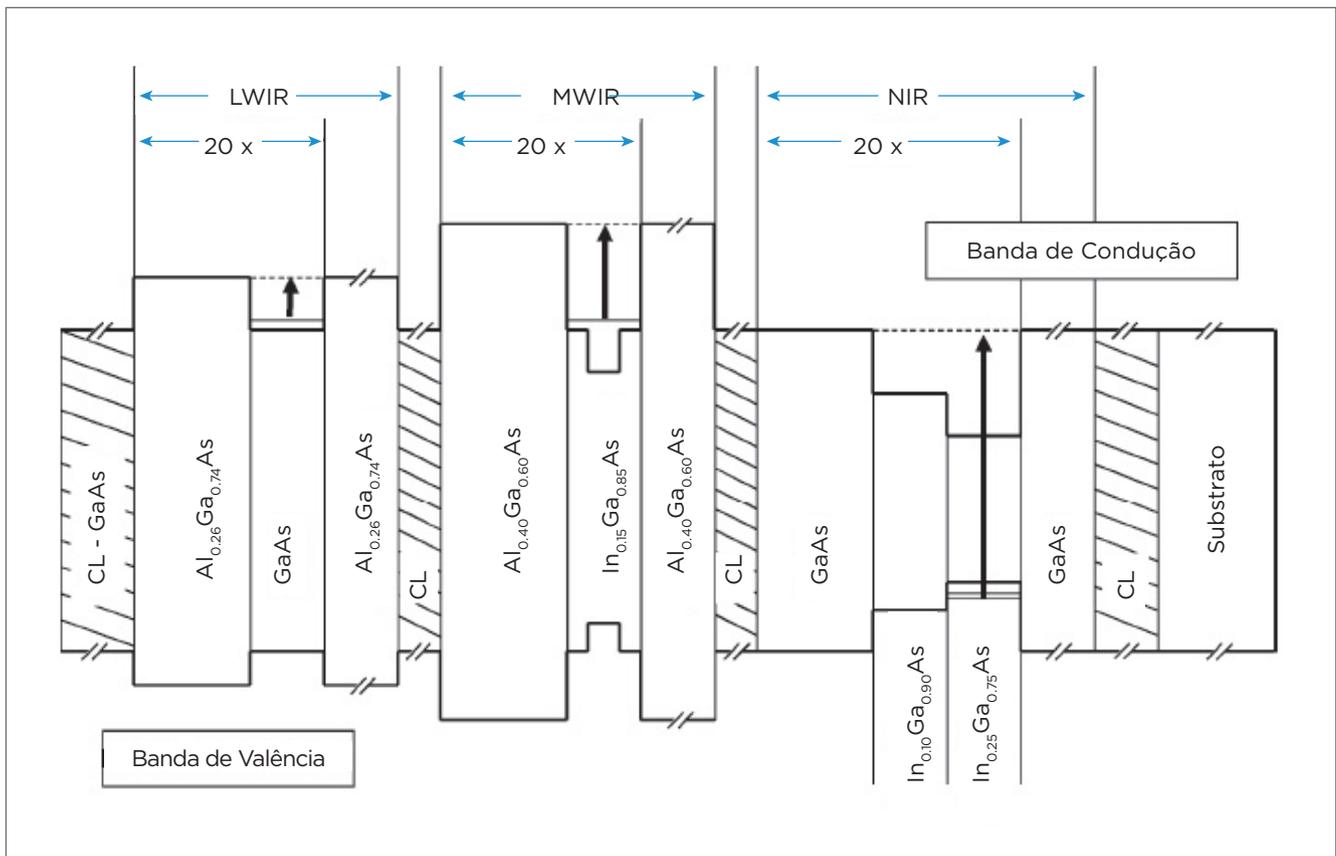


Figura 6. Diagrama esquemático das bandas de energia do fotodetector infravermelho à poços quânticos 3-band. As larguras de cada camada não foram desenhadas em escala (ALVES, 2005).

(HARRISON, 2005), devido a sua versatilidade para cálculo de estruturas complexas. A seguir, são resolvidas as equações que modelam as figuras de mérito, detalhadas na próxima seção.

Os dados experimentais para comparação com as simulações de A foram obtidos a partir das medições descritas no trabalho de Alves (2005), enquanto para as demais amostras foram extraídos diretamente dos gráficos disponíveis nas referências anteriormente mencionadas — por meio da ferramenta gráfica GraphData 1.0® — e das análises — por meio do *software* Origin®.

3. RESULTADOS

3.1. ESPECTRO DE ABSORÇÃO

O espectro de absorção representa a principal característica da amostra da estrutura cristalina, permitindo sua avaliação antes de se fabricar o detector propriamente dito. Ele indica a faixa de operação do detector e o tipo de transição quântica decorrente da interação fóton-elétron. A estimativa teórica desse espectro pode ser obtida por intermédio das Equações 1 e 2 (ALVES, 2005):

$$\alpha_{CbCb}(\hbar\omega) = \frac{q^2 d}{(m_e^*)^2 \epsilon_0 n_r c(\hbar\omega)} \left| \Psi_f(z) \right| \left| \frac{\partial}{\partial z} \Psi_i(z) \right|^2 X \cos^2 \phi \frac{\Gamma}{(E_f - E - \hbar\omega)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (1)$$

onde α_{CbCb} é o coeficiente de absorção, considerando transições entre níveis confinados da banda de condução (*bound-to-bound*); d é a densidade de dopantes; E_i e E_f representam os níveis de energia inicial e final, respectivamente; q é a carga do elétron; c é a velocidade da luz no vácuo; ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo; Γ é o parâmetro de alargamento; ω \hbar é a energia do fóton incidente; m_e^* é a massa efetiva do elétron; e ϕ é o ângulo entre o fluxo incidente e o eixo de crescimento.

$$\alpha_{CbC}(\hbar\omega) = \frac{q^2 d}{(m_e^*)^2 \epsilon_0 n_r c(\hbar\omega)} \frac{L_F}{\pi} \sqrt{\frac{m_{e,b}^*}{2(E_f - V_0)}} X \left| \Psi_f(z) \right| \left| \frac{\partial}{\partial z} \Psi_i(z) \right|^2 X \cos^2(\phi) \quad (2)$$

onde α_{CbC} é o coeficiente de absorção, considerando transições entre um nível confinado e níveis no contínuo, na banda de condução; L_F é a razão entre π e o vetor de onda k_{LF} ; e V_0 é a energia da barreira.

As características das amostras estão listadas na Tabela 2. Os parâmetros necessários para se resolver (1) e (2) são extraídos de Vurgaftman e Meyer (2001). Dessa forma, foram estimados os espectros de absorção das amostras

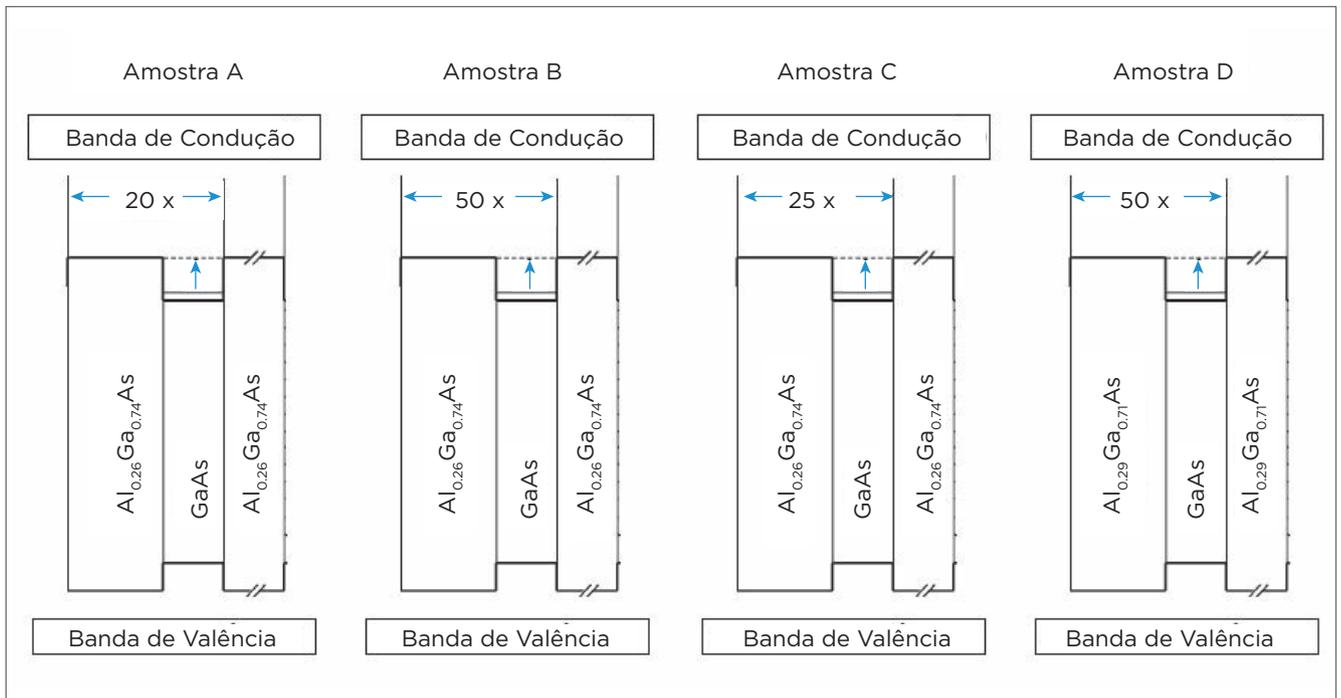


Figura 8. Diagrama esquemático das bandas de energia dos fotodetectores utilizados nas simulações. As larguras de cada camada não foram desenhadas em escala.

A e B, para a temperatura de 300 K. Valores absolutos de amplitude apresentaram diferenças de ordem de grandeza. Esse fato é devido ao grande número de incertezas nos parâmetros dos materiais semicondutores constituintes da estrutura das amostras (VURGAFTMAN; MEYER, 2001). Dessa forma, à época das simulações, foi priorizada a determinação do comprimento de onda de pico, sem considerar o coeficiente de alargamento, diante da imprecisão mencionada. Quando o coeficiente de absorção é normalizado (Figura 9), obtém-se uma boa estimativa, com erros menores que 6,03% para o comprimento de onda de pico. Isso mostra que o cálculo dos níveis confinados por meio do método de *shooting* é bem razoável.

3.2. CORRENTE DE ESCURO

A corrente de escuro é a figura de mérito que representa o quanto de corrente é gerada no fotodetector sem a influência da radiação incidente (ou seja, no escuro). Três mecanismos de geração da corrente de escuro podem ser identificados nos dispositivos de poços quânticos: tunelamento ressonante sequencial, tunelamento assistido pela temperatura e efeito termiônico. O cálculo da corrente de escuro é um procedimento complexo que depende de várias grandezas. A primeira grandeza a ser calculada é a massa efetiva ponderada do elétron no detector, a partir da proporção de barreiras e poços no detector. O procedimento é feito por meio da determinação das massas efetivas do elétron na barreira (FU;

WILLANDER, 1998) — formada pela composição ternária AlGaAs a partir das composições binárias GaAs e AlAs — e no poço — formado somente pela composição binária GaAs. A segunda grandeza é a mobilidade ponderada dos portadores, que também é obtida a partir das mobilidades na barreira e no poço. A terceira é a velocidade de saturação ponderada no detector. Esses parâmetros foram obtidos também considerando modelos contidos em *Institute of Microelectronic's Site* (2014). Mais detalhes em Issmael Junior (2007).

Uma das formas de representar a corrente de escuro em QWIP é dada pela Equação 3 (LEVINE, 1993):

$$I_D(F) = \frac{e \cdot v_{drift} \cdot A \cdot m_w^*}{\pi \hbar^2 L} \int_{E_i}^{\infty} f^{FD}(E) \cdot T(E, F) dE \quad (3)$$

onde o termo fora da integral é a densidade de estados dividida pelo período dos múltiplos poços quânticos (L), e o termo $f^{FD}(E)$ representa a distribuição de Fermi-Dirac, dada pela Equação 4 (ALVES, 2005):

$$f^{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{k_B T}}} \quad (4)$$

onde E_f representa o nível de Fermi bidimensional, k_B , a constante de Boltzman, e T , a temperatura. O coeficiente de tunelamento — $T(E, F)$ — é dependente da tensão de polarização e , para uma barreira simples, pode ser representado como nas Equações 5, 6 e 7 (ANDREWS; MILLER, 1991):

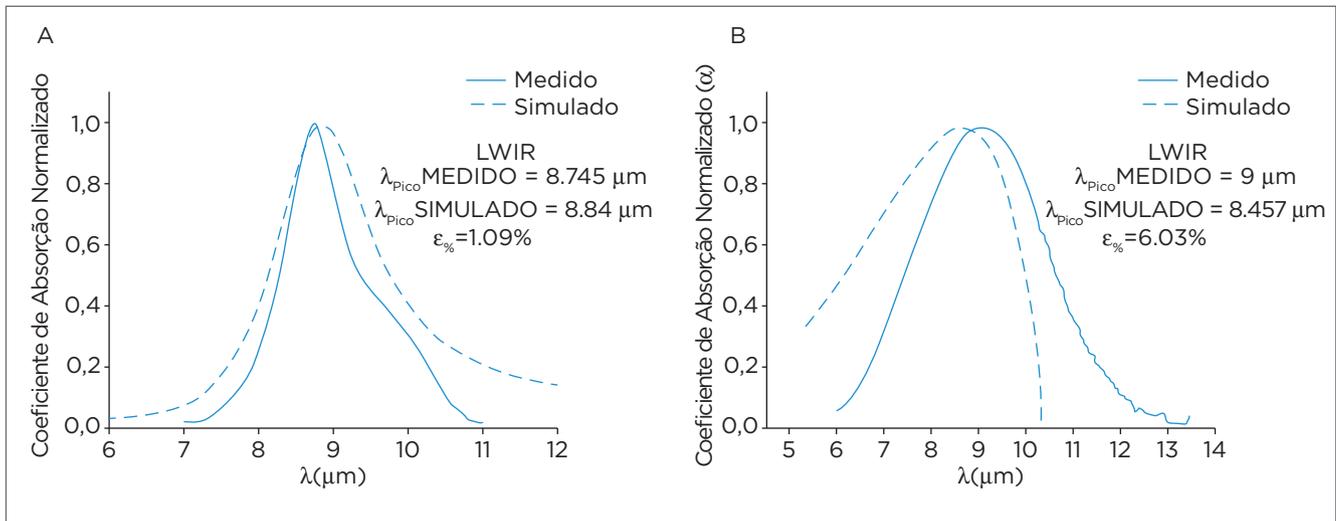


Figura 9. Comparação entre os valores estimados e medidos do coeficiente de absorção normalizado (A) da amostra A (ALVES, 2005) e (B) da amostra B (GUNAPALA; BANDARA, 1999).

$$T(E, F) = \exp \left(- \frac{4L_b}{3qV} \left(\frac{2m^*}{\hbar} \right)^{1/2} \left[(V_o - E)^{3/2} - (V_o - E - qv)^{3/2} \right] \right) \quad (5)$$

para $E_o < E < V_o - qV$;

$$T(E, F) = \exp \left(- \frac{4L_b}{3qV} \left(\frac{2m^*}{\hbar} \right)^{1/2} \left[(V_o - E)^{3/2} \right] \right) \quad (6)$$

para $V_o - qV < E < V_o$; e

$$T(E, F) = 1 \quad (7)$$

para $E > V_o$.

V representa a tensão aplicada por período de estrutura de poço. No caso de elétrons, a velocidade de deriva (v_{drift}) em função do campo F aplicado é dada pela Equação 8 (ALVES, 2005):

$$v_{drift} = \frac{\mu F}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu F}{v_{sat}} \right)^2}} \quad (8)$$

Utilizando os valores de mobilidade (μ) igual a $0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$ e a velocidade de saturação (v_{sat}) igual a 5.10^4 m/s constantes, foram estimadas as correntes de escuro para a amostra D (Tabela 1). Os valores teóricos apresentaram um erro sistemático de 9% para todas as temperaturas. Aplicando-se essa correção, obtém-se o resultado da Figura 10. As temperaturas menores que 50 K são pobremente representadas por esse modelo e não foram incluídas na figura.

Observa-se que os modelos representam bem os fenômenos, afastando-se um pouco mais para valores de tensão de polarização menores que 1,0 V.

Em seguida, comparam-se os resultados da amostra A (Tabela 1) para as temperaturas 100, 90, 80, 77, 70, 60, 50 e 40 K. Para essa estrutura não foi aplicado fator de correção, sendo apresentados os valores absolutos na Figura 11.

Verifica-se que a teoria representa bem o comportamento do dispositivo real para temperaturas acima de 60 K e tensão de polarização maior que 1,0 V, para os critérios simplificados considerados. As discrepâncias observadas podem ter

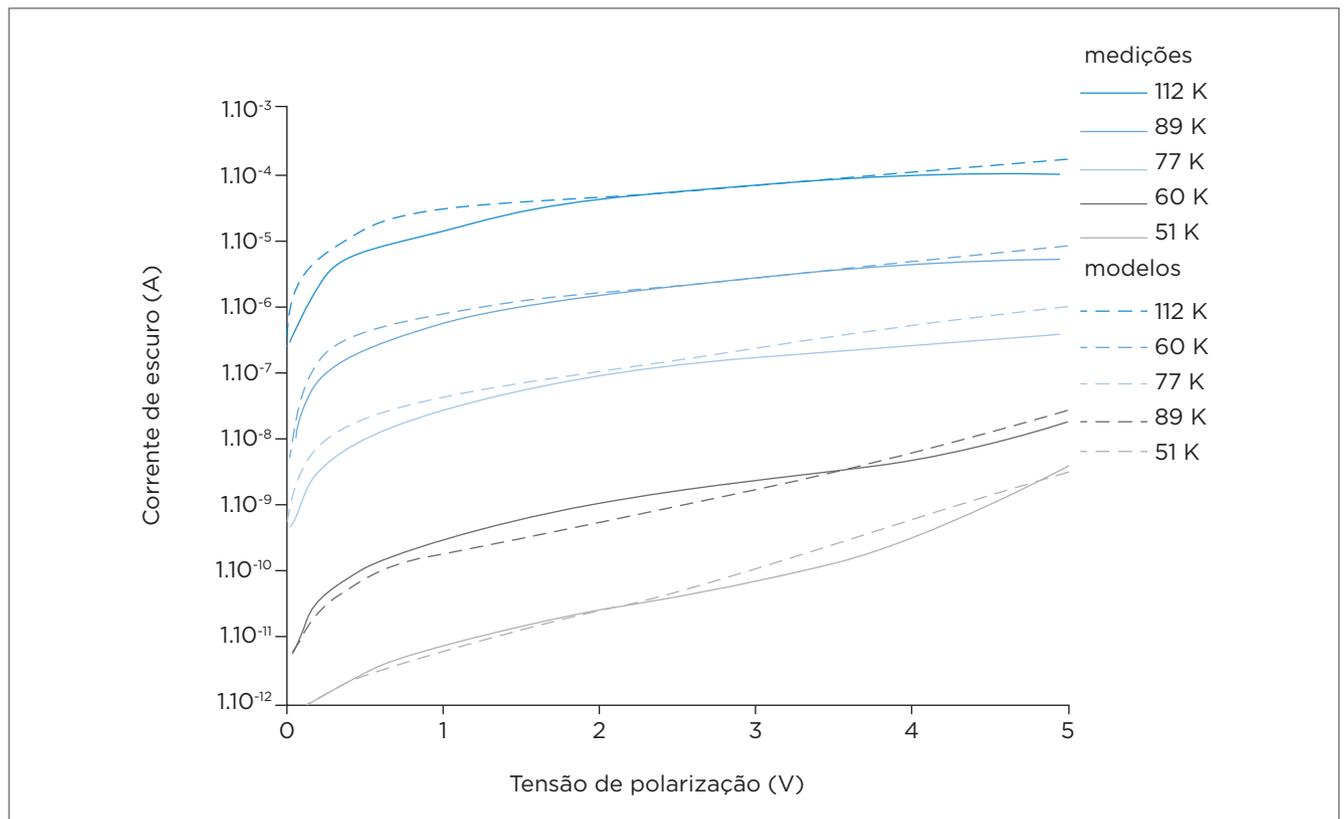


Figura 10. Comparação entre as curvas $I \times V$ no escuro para a amostra D da Tabela 2 com a mobilidade e a velocidade de saturação constantes (ISSMAEL JUNIOR, 2007).

várias razões, tais como o fato de a configuração do detector ser parte de um dispositivo multicamada, no qual as camadas NIR e MWIR podem interferir nas medidas; e o aumento da probabilidade de tunelamento induzido pelo campo elétrico externo. Estudos mais aprofundados devem ser realizados para a obtenção de um modelo único e genérico. Como não dispúnhamos, à época das simulações, do detector da amostra A, não foi possível realizar medições com polarizações negativa e positiva, o que permitiria uma comparação e análise mais precisa com o resultado obtido.

3.3. RESPONSABILIDADE

A responsividade quantifica a razão de fotocorrente gerada pela potência de radiação de fótons incidente no detector. Matematicamente é dada pela Equação 9 (ALVES, 2005):

$$R(F) = \frac{I_p(F)}{\Phi_o} \tag{9}$$

onde, $I_p(F)$ é a fotocorrente e Φ_o é a potência óptica incidente.

A fotocorrente pode ser expressa pela Equação 10 (ALVES, 2005):

$$I_p(F) \approx \frac{2q\Phi_o}{\hbar\omega} \alpha L_w \sum_{n=1}^N e^{\frac{nL}{v_{drift}(F)\tau}} \tag{10}$$

onde α é o coeficiente de absorção, Φ_o é a potência óptica incidente, $\hbar\omega$ é a energia do fóton, q é a carga do elétron, L é o período de repetição poço/barreira, L_w é a largura do poço, $v(F)$ é a velocidade de deriva dos elétrons sobre a influência do campo elétrico F e τ é o tempo de vida do portador extraído do poço. Por meio da combinação dessas duas expressões obtém-se a Equação 11:

$$R_p(F) \approx \frac{2q}{\hbar\omega} \alpha L_w \sum_{n=1}^N e^{\frac{nL}{v_{drift}(F)\tau}} \tag{11}$$

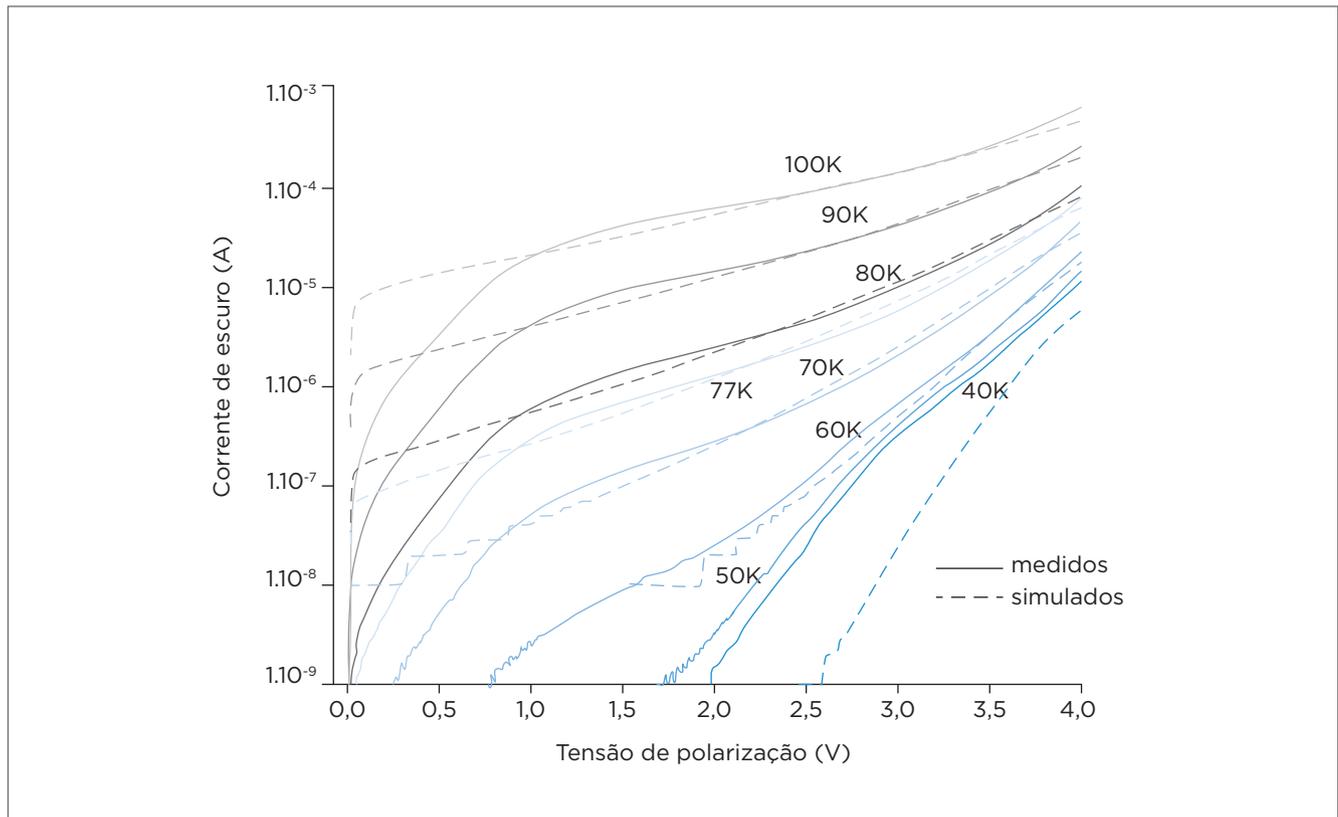


Figura 11. Comparação entre as curvas IxV no escuro para a amostra A da Tabela 2, para temperaturas de 40 a 100 K (ISSMAEL JUNIOR, 2007).

Foram realizadas simulações da responsividade normalizada do fotodetector de Alves (2005) — amostra A da Tabela 1 — para as tensões de 0,5, 1,0 e 1,5 V, para uma temperatura de 10 K. Essas curvas foram comparadas com as medidas realizadas por Hanson (2006). O erro entre o valor do comprimento de onda de pico simulado e o medido ficou em 2,53% para uma tensão de polarização de 0,5 V — Figura 12; 1,68% para tensão de polarização de 1,0 V — Figura 13; e 1,17% para tensão de polarização de 1,5 V — Figura 14.

Verifica-se uma consistência entre os valores teóricos e as medidas, com erros menores que 3% e diminuindo à medida que a tensão de polarização aumenta. Entretanto, é necessário melhorar a modelagem do coeficiente de absorção, para que as simulações da responsividade se aproximem da realidade, sem a utilização da normalização.

4. DISCUSSÃO E OBSERVAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de investigar a capacidade dos modelos existentes na literatura de representar as principais figuras

de mérito de QWIP, foram realizadas várias comparações. Observou-se a dificuldade de modelar os fenômenos a temperaturas abaixo de 50 K. Também se observou que devido ao número elevado de fatores que influenciam as figuras de mérito — tais como precisão no crescimento, precisão dos valores de *bandoffset*, massa efetiva, *bandgap*, ionização de dopantes, entre outros —, os valores absolutos das amplitudes têm pouco significado nos cálculos teóricos. Em contrapartida, a metodologia utilizada para o cálculo dos níveis de energia confinados e suas respectivas funções de onda se mostrou eficaz (ALVES, 2005). Tentativas de adaptação dos modelos têm sido feitas e necessitam de outros ciclos de fabricação para que sua efetividade seja testada. Esses resultados serão publicados em trabalhos futuros.

Por fim, 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 infravermelha, de forma a conduzir o nosso país rumo à independência e ao desenvolvimento autóctone desse campo estratégico do conhecimento.

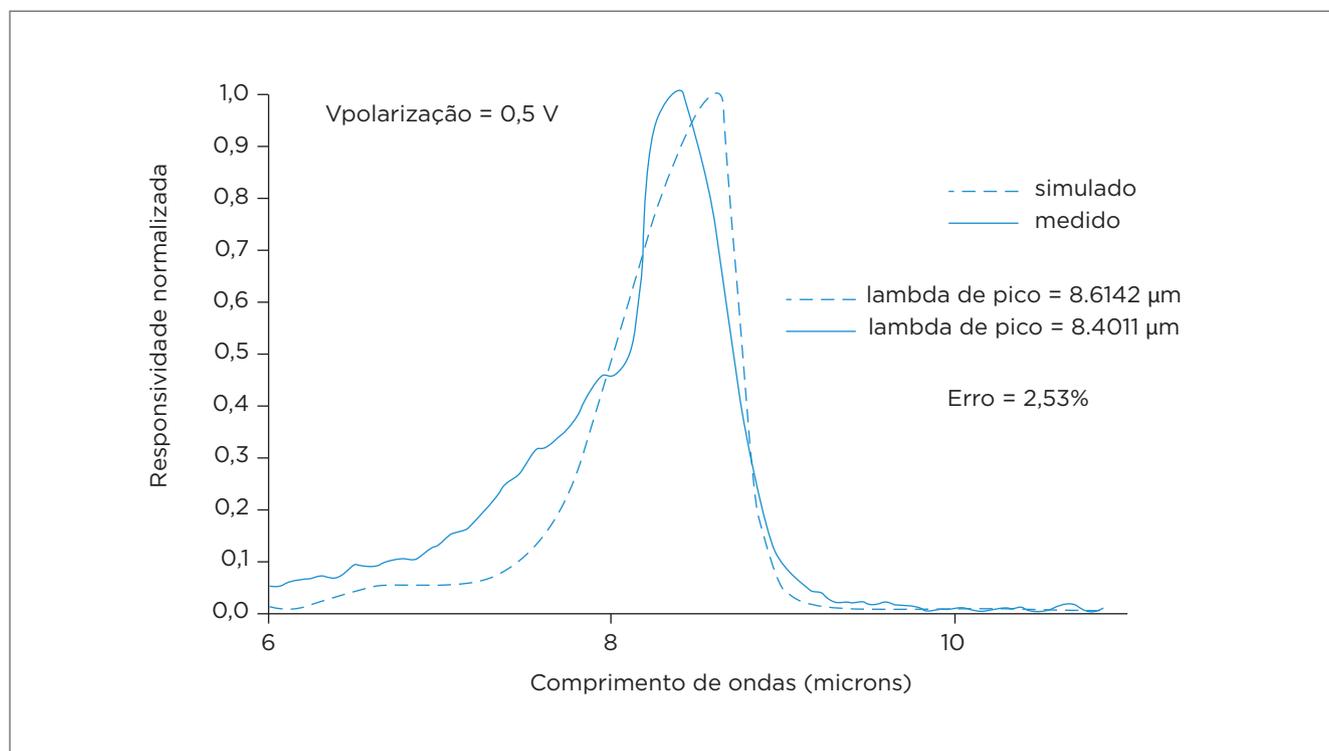


Figura 12. Resultados normalizados da responsividade simulada e medida em função do comprimento de onda para a tensão de polarização de 0,5 V (ISSMAEL JUNIOR, 2007).

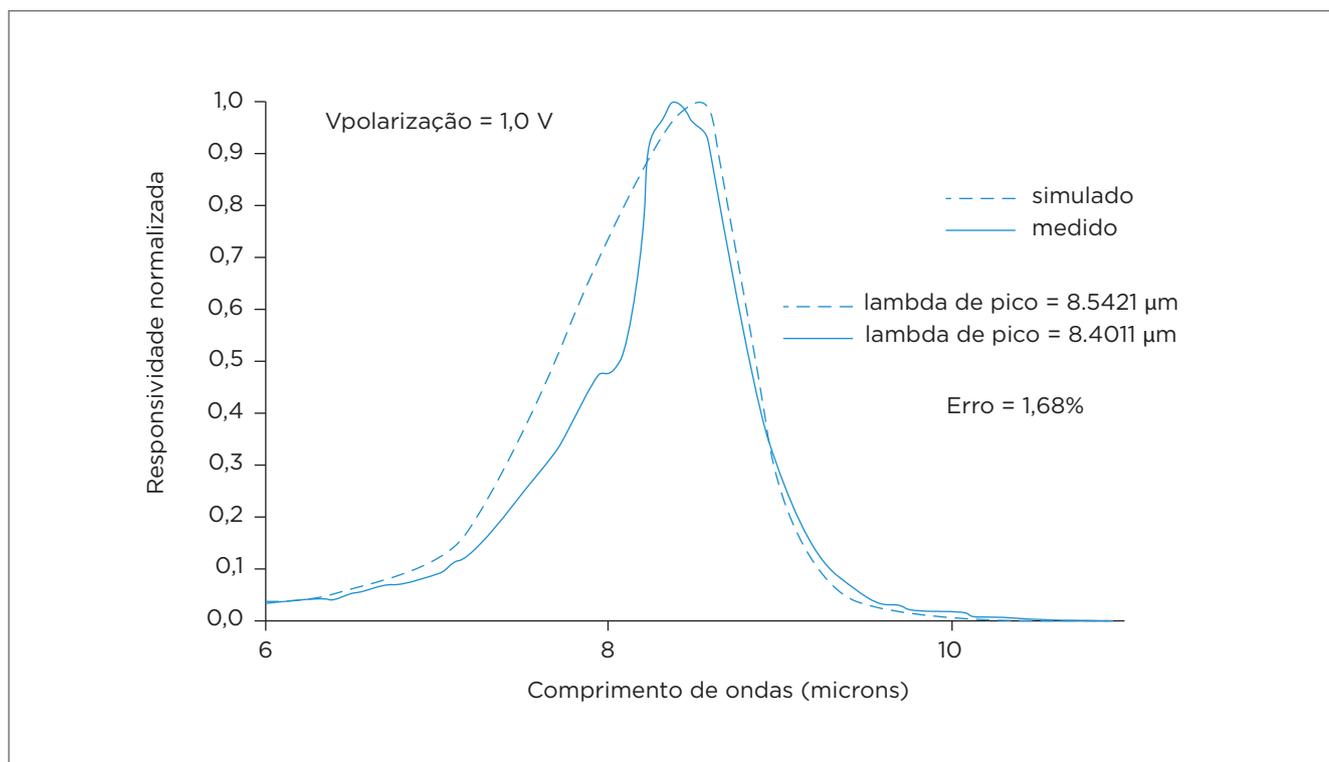


Figura 13. Resultados normalizados da responsividade simulada e medida em função do comprimento de onda para a tensão de polarização de 1,0 V (ISSMAEL JUNIOR, 2007).

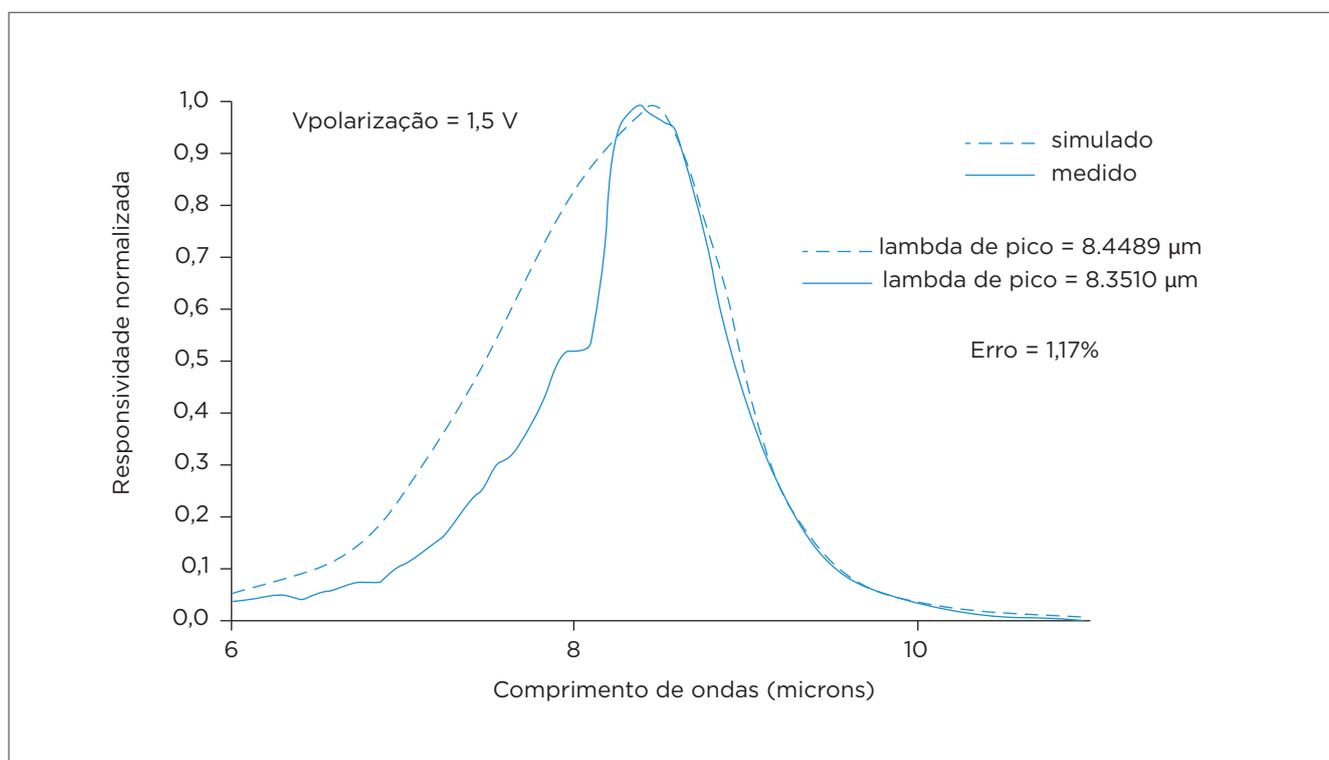


Figura 14. Resultados normalizados da responsividade simulada e medida em função do comprimento de onda para tensão de polarização de 1,5 V (ISSMAEL JUNIOR, 2007).

REFERÊNCIAS

- ALVES, F.D.P. *Design and Analysis of a Multicolor Quantum Well Infrared Photodetector*. United States Naval Postgraduate School Master's Thesis, september 2005.
- ALVES, F.D.P.; TAVARES SANTOS, R.A.; AMORIM, J.; ISSMAEL JR., A.K.; KARUMASIRI, G. Widely Separate Spectral Sensitivity Quantum Well Infrared Photodetector Using Interband and Intersubband Transitions. *IEEE Sensors Journal*, v. 8, p. 842-848, 2008.
- ALVES, F.D.P.; KURUNASIRI, G.; HANSON, N.; BYLOOS, M.; LIU, H.C.; BEZINGER, A.; et al. NIR, MWIR and LWIR quantum well infrared photodetector using interband and intersubband transitions. *Infrared Physics & Technology*. Elsevier, v. 50, p. 182-186, 2007.
- ANDREWS, S.R.; MILLER, B.A. Experimental and theoretical studies of the performance of quantum well infrared detectors. *Journal of Applied Physics*, v. 2, n. 70, 1991.
- BOSCHETTI, C. *O espectro infravermelho*. Disponível em: <<http://www.las.inpe.br/-cesar/Infrared/espectro.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2015.
- Dyer, W.R; Tidrow, M.Z. QWIP technology applications to ballistic missile defense. *Proceedings of SPIE*, v. 3553, p. 231-238, 1998.
- FU, Y.; WILLANDER, M. Optical coupling in quantum well infrared photodetector by diffraction grating. *Journal of Applied Physics*, v. 84, n. 10, 1998.
- GUNAPALA, S.D. *What is QWIP Technology?*
- GUNAPALA, S.D.; BANDARA, S.V. Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) Focal Plane Arrays. *Semiconductors and Semimetals*, v. 62, 1999.
- GUNAPALA, S.D.; BANDARA, S.V.; LIU, J.K.; SIR RAFOL; SHOTT, C.A.; JONES, R.; et al. 640x512 pixel four-band, broad-band, and narrow-band quantum well infrared photodetector focal plane arrays. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/233980001_640x512_pixel_four-band_broad-band_and_narrow-band_quantum_well_infrared_photodetector_focal_plane_arrays>. Acesso em: 09 mar. 2007.
- HANSON, N.A. *Characterization and analysis of a multicolor quantum well infrared photodetector*. United States Naval Postgraduate School Master's Thesis, Monterey, California, June 2006.
- HARRISON, P. *Quantum wells, wires and dots: theoretical and computational physics*. 2 ed. Wiley, Chichester, UK, 2005.
- INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Sensor de infravermelho agora é capaz de ver em cores. *Site Inovação tecnológica*, 2006. Disponível em: <<http://inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110060526>>. Acesso em: 15 abr. 2015.
- Institute of Microelectronic's site. *Low Field Mobility*. Disponível em: <<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/quay/node34.html>>. Acesso em: 30 nov. 2014.
- Institute of Microelectronic's site. *Semiconductor Alloys*. Disponível em: <<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/quay/node35.html>>. Acesso em: 30 nov. 2014.
- Institute of Microelectronic's site. *Velocity Saturation*. Disponível em: <<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/palankovski/node48.html>>. Acesso em: 30 nov. 2014.
- Issmael Junior, A.K. *Estudo, modelamento e simulação das principais figuras de mérito de fotodetectores infravermelhos à poços quânticos*. 106 f. Monografia – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.
- ISSMAEL JR, A.K.; ALVES, F.D.P.; TAVARES SANTOS, R.A. *Estudo, modelamento e simulação das principais figuras de mérito de fotodetectores infravermelhos à poços quânticos*. IX Simpósio de Guerra Eletrônica, 2007. Disponível em: <http://www.sige.ita.br/anais/IXSIGE/Artigos/GE_01.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2015.
- Levine, B.F. Quantum well infrared photodetectors. *Journal of Applied Physics*, v. 8, n. 74, 1993.
- MISSILE DEFENSE AGENCE. *Site da MDA*.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *My NASA Data site*. Disponível em: <<http://mynasadata.larc.nasa.gov/ElectroMag.html>>. Acesso em: 24 mar. 2007.
- SANTOS, R.A.T. *Proposta de Metodologia para Estimação do Envelope Infravermelho de Aeronaves*. Tese (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.
- VURGAFTMAN, I.; MEYER, J.R.; RAM-MOHAN, L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics Review*, v. 89, n. 11, p. 5815-5875, 2001.