

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE MODELOS DE
DIODOS A TUNELAMENTO RESSONANTE
PARA SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS**

Monique Cruvinel Bandeira

Brasília, julho de 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE MODELOS DE
DIODOS A TUNELAMENTO RESSONANTE
PARA SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS**

Monique Cruvinel Bandeira

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Janaína Gonçalves Guimarães, ENE/UnB _____
Orientador

Prof. Artemis Marti Ceschin, ENE/UnB _____
Examinador interno

Prof. Alexandre Pessoa Peixoto, ENE/UnB _____
Examinador interno

Dedicatória

Dedico este projeto final ao meu pai José Bandeira Júnior que mesmo sem saber foi o primeiro a inspirar-me nos caminhos da engenharia.

"A vida é um sonho, em breve acordaremos"

Santa Terezinha do Menino Jesus

Monique Cruvinel Bandeira

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a minha mãe Heloisa por ter me acompanhado durante estes anos de curso. Sem seu apoio eu seguramente não teria chegado tão longe! Aos meus amigos e familiares por terem me apoiado, em especial nos momentos difíceis de provas e decisões. As amigas e amigos de curso que me ajudaram e apoiaram no caminho. Ao meu namorado Oscar pelos anos de atenção e carinho, por ter me apoiado em especial nessa última fase de tantas loucuras e correrias. A minha orientadora Janaína, por toda a dedicação não apenas a este trabalho mas como profissional e pessoa, por inspirar a todos nós a sermos grandes engenheiros. A Deus por ter me amado primeiro, por ter me chamado ao Regnum Christi, e a partir dEle, agradecer imensamente às minhas queridas diretoras espirituais Cristina e Cecília por terem me guiado por sombras e tempestades e comemorado comigo cada uma de minhas vitórias!

Fiat Voluntas Tua

Monique Cruvinel Bandeira

RESUMO

Este projeto apresenta modelagens de diodos a tunelamento resonante de pequenos e grandes sinais para utilização em rotinas de simulação de circuitos. Todos os modelos foram retirados da bibliografia pesquisada exceto pelo modelo baseado em redes neurais de base radial que foi apresentado pela autora pela primeira vez em seu trabalho *Modeling Negative Differential Resistance (NDR) Devices using Radial Basis Function Neural Networks* [1]. As rotinas foram simuladas com a ajuda dos softwares MATLAB e LTSpice e, ao final, uma grande análise comparativa é feita entre todos os modelos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	DIODO A TUNELAMENTO RESSONANTE	3
2.2	MODELAGEM	5
2.2.1	MODELO DE GRANDES SINAIS BASEADO EM REDES NEURAIS DE BASE RADIAL ..	6
2.2.2	MODELO DE GRANDES SINAIS BASEADO NA ESTRUTURA E PROCESSOS FÍSICOS	7
2.2.3	MODELO DE GRANDES SINAIS BASEADO EM ELEMENTOS DE CIRCUITO	8
2.2.4	MODELO DE PEQUENOS SINAIS BASEADO EM ELEMENTOS DE CIRCUITO	9
2.3	PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO	9
2.3.1	MATLAB	9
2.3.2	SPICE	10
3	METODOLOGIA	11
3.1	METODOLOGIA	11
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	13
4.1	RESULTADOS	13
4.1.1	MODELOS DE GRANDES SINAIS	13
4.1.2	MODELO DE PEQUENOS SINAIS	15
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	19
5.1	MODELOS DE GRANDES SINAIS	19
5.2	MODELO DE PEQUENOS SINAIS	21
5.3	PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO	23
5.4	PROBLEMAS DE BIBLIOGRAFIA	23
6	CONCLUSÕES	24
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
	ANEXOS	27
I	ROTINAS MATLAB E NETLIST SPICE	28
I.1	ROTINA MATLAB PARA MODELO BASEADO EM REDES NEURAIS	28

I.2	ROTINA MATLAB PARA MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO	29
I.3	NETLIST CRIADA POR NECULOIU ET AL. PARA SIMULAÇÃO DO SEU MODELO	32
I	BIBLIOTECA DE RTDs CRIADA PELO MODELO DE REDES NEURAS.....	34

LISTA DE FIGURAS

2.1	Imagem de um corte de seção transversal de um RTD Si/SiGe [2]	3
2.2	Princípio de operação do elemento de transição lógico monoestável-biestável [3]	4
2.3	Processo de transporte físico através da barreira dupla [4]	4
2.4	Curvas esquemáticas da contribuição da I1 - corrente de tunelamento, I2 - corrente emissão termiônica e a curva IV característica I [2]	5
2.5	Arquitetura da rede neural de base radial	6
2.6	Curva IV encontrada por Schulman et al. em [5] modificado	8
2.7	Esquemático do modelo proposto por Neculoiu et al. em [6]	8
2.8	Curva IV encontrada por Dan Neculoiu e Teodor Tebeanu em [6] modificada	9
2.9	Modelo apresentado por Miles et al. em [7]	10
3.1	Esquema metodológico deste projeto	12
4.1	Apresentação do bloco de trabalho do modelo de redes neurais	13
4.2	Esquemático implementado no LTspice para a simulação do modelo de circuitos	14
4.3	Curvas IV de validação dos modelos. + representam os dados e as curvas são as aproximações geradas.	14
4.4	Curvas IV para cada um dos modelos; Redes neurais (azul), Físico-Matemático (rosa) e de Circuitos (preto) - '+' dados experimentais	15
4.5	Esquema de um circuito MOBILE utilizando RTDs	16
4.6	Contribuição da corrente de tunelamento e da corrente termiônica para os modelos físico-matemático (rosa) e de circuitos (preto)	17
4.7	Funcionamento do circuito inversor polarizado com Vdd=1V	17
4.8	Saída do circuito MOBILE para o modelo de Redes Neurais	17
4.9	Saída do circuito MOBILE para o modelo Físico-Matemático	17
4.10	Saída do circuito MOBILE para o modelo de Circuitos	17
4.11	Gráfico do comportamento biestável de todos os modelos	18
4.12	Aproximação do modelo de circuitos gerada depois de manipulação dos parâmetros. '+' dados experimentais, 'preto' antiga proposta de aproximação, 'marrom' nova proposta	18
5.1	4 saídas encontradas por Le et al para (a) HSPICE com grande passo (b) HSPICE com pequeno passo (C) SPICE3 e (d) ACESn	22
5.2	Problema no circuito inversor ao aumentar a frequência da onda de entrada para 500MHz	22

I.1	RTD modelado a partir dos dados experimentais de [8]	34
I.2	RTD modelado a partir dos dados experimentais de [9]	35
I.3	RTD modelado a partir dos dados experimentais de [10].....	35
I.4	RTD modelado a partir dos dados experimentais de [10].....	35

LISTA DE TABELAS

2.1	Valores constantes para os elementos parasitários.....	9
4.1	Resultado do cálculo dos parâmetros	15
4.2	Tempos médios de simulação para cada modelo	15
4.3	Valores dos parâmetros para quatro pontos de polarização do modelo de pequenos sinais	16
4.4	Valores comparativos do tempo de simulação entre três métodos de simulação do circuito inversor	16

LISTA DE SÍMBOLOS

Constantes

e, q	Carga do elétron	1,6021[10 ¹⁹ C]
m^*	Massa específica do elétron	9,109[10 ⁻³¹ kg]
k	Constante de Boltzman	1,3806 [10 ²³ m ² kg s ² K ⁻¹]
h	Constante de Plank reduzida	1,0545[10 ³⁴ Js]

Parâmetros dependentes do material

T	Temperatura de operação	[°C]
Γ	Largura de Ressonância	[nm]
E_F	Energia de Fermi	[eV]
E_r	Energia de Ressonância	[eV]
J	Densidade de corrente	
I	Corrente	[A]
V	Tensão	[V]

Siglas

RTD	Resonant Tunneling Diode	Diodo a Tunelamento Ressonante
NDR	Negative Differential Resistance	Resistência Diferencial Negativa
IV	Curve Current-Voltage	Curva Corrente-Tensão
MOBILE	MONostable-BIstable Logic Element	Elemento lógico monoestável-biestável
AC	Alternating Current	Corrente Alternada
MATLAB	MATrix LABoratory	Laboratório de Matrizes
SPICE	Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis	Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados
ACES	Adaptively controlled explicit integration method	Método de integração controlada explícita adaptável

Capítulo 1

Introdução

"As pessoas viajam para admirar a altura das montanhas, as imensas ondas dos mares, o longo percurso dos rios, o vasto domínio do oceano, o movimento circular das estrelas, e no entanto elas passam por si mesmas sem se admirarem."

Santo Agostinho

A contínua busca por novos materiais, técnicas e soluções levam os cientistas a quebrar barreiras em todas as áreas. Nos últimos anos, a convergência entre física, química e biologia levou a novas descobertas e ao estudo de dispositivos em nanoescala. Porém, em tal escala, as características individuais de moléculas e átomos, em especial o efeito quântico, começam a ser significativos já que o sistema chega a escala do próprio comprimento de onda do elétron. Assim, surgiu a nanotecnologia, que pode ser definida como "tecnologia que trabalha com dispositivos em uma escala menor que 100nm", e que graças a essa escala começaram a exibir nova e significativa melhora em suas propriedades. [11].

Em 1965, Gordon Moore declarou em um dos seus estudos que a cada 18 meses a capacidade de processamento dos processadores dobraria - também resultado da diminuição das dimensões características do transistor -, esse estudo ficou conhecido como lei de Moore. Nas últimas décadas, o rápido progresso tecnológico permitiu o desenvolvimento de processadores cada vez mais rápidos, tendo a implementação de seus componentes uma densidade cada vez maior. Além da motivação científica com o limite da miniaturização, os pesquisadores foram impulsionados especialmente pela indústria de semicondutores.

Nos trabalhos em microeletrônica, os efeitos quânticos mostraram que a física clássica não era suficiente na crescente miniaturização da tecnologia MOS. A solução encontrada foi iniciar a pesquisa sobre fabricação, caracterização, simulação e implementação de novos dispositivos que pudessem substituir a antiga tecnologia. Iniciou-se então, com a nanoeletrônica, os trabalhos como: transistores mono-elétron, pontos quânticos, diodos de tunelamento ressonante, entre outros [3, 12]. As características específicas de cada um desses dispositivos permitem gerar novas metodologias de projeto, implementação de novas funções, maior integração de dispositivos e novas aplicações. Logo, mais do que substituir a microtecnologia, a nanoeletrônica pretende criar maneiras mais

eficientes de resolver os mesmos problemas e ainda criar novas soluções.

Entretanto, apesar das maravilhas que se espera de uma nova tecnologia, trabalhar com física quântica e teorias de transporte quântico não é tão simples quanto os trabalhos já consolidados da física clássica. E assim, apenas modelar novos dispositivos passa a ser uma tarefa formidável. Mas para que a nanoeletrônica torne-se realidade, é essencial que os novos dispositivos e circuitos sejam fabricados com precisão nanométria ou os transportes quânticos encontrarão ainda mais problemas. Isso levou a esforços em três áreas: nanofabricação, modelagem quântica e inovações de circuitos [4].

Duas características muito importantes dos dispositivos nanoeletrônicos são as curvas características corrente-tensão ditas não-monótonas, ou seja, que apresentam picos e vales, e a sensibilidade a mudanças incertas do ambiente. Enquanto este permite grande aplicação em sensores e sistemas sensitivos aquele permite novas aplicações em chaveamentos e sistemas lógicos. Um exemplo de novas aplicações é feito pelo trabalho com resistência diferencial negativa - na curva corrente-tensão - que permite uma significativa redução da complexidade dos circuitos e um rápido chaveamento em temperatura ambiente [4]. Essa característica tem potencial para implementações de memórias e circuitos lógicos em baixa potência [8] e aparecem em dispositivos como o *resonant tunneling diode* (RTD): o diodo a tunelamento ressonante. Comparado com a tecnologia convencional, RTDs podem realizar os mesmos circuitos, mas com uma complexidade reduzida.

1.1 Objetivo

Este trabalho visa modelar as curvas características corrente-tensão de diodos a tunelamento ressonante a partir de modelos de grandes sinais. O estudo pretende mostrar uma modelagem apresentada em [1] além dos trabalhos de Neculoiu et al. e Schulman et al. Pretende, como estes modelos, simular um circuito básico que usufrua corretamente da principal característica dos RTDs: a região diferencial negativa em sua curva.

Cada modelo deve ser testado e verificado separadamente e suas principais características devem ser analisadas. Após testes de compatibilidade com os simuladores, os modelos serão implementados modelando um mesmo RTD e simulando com este o circuito básico proposto. Uma comparação objetiva entre tempos de processamento entre todos os modelos será feita além de uma análise individual das vantagens e desvantagens de cada um.

Como segundo ponto, este trabalho visa aplicar os conhecimentos sobre os dispositivos RTDs em uma modelagem de pequenos sinais proposta por Miles et al. A verificação desse modelo deverá ser feita a partir de um circuito análogo ao usado na simulação para grandes sinais mas que apresente características que possam ser analisadas em uma discussão sobre frequência e ainda serem comparadas com outros trabalhos da área.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

"Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende"

Leonardo da Vinci

2.1 Diodo a Tunelamento Ressonante

O diodo a tunelamento, considerado o elemento de tunelamento mais popular, foi implementado pela primeira vez em 1968. Mas apenas quando novas formas de integração, como o diodo a tunelamento ressonante, foram desenvolvidas, que o diodo a tunelamento começou a ser reconhecido. Mais ainda, RTDs são considerados, hoje, os dispositivos nanoeletrônicos mais estáveis, já que trabalham a temperatura ambiente - graças a baixa capacitância entre as camadas muito finas de material, considerada uma das características mais importantes que qualquer nova tecnologia deve satisfazer. Além disso, existe uma interface já estudada entre estes e os transistores MOS [3], o que facilita a sua integração com a tecnologia atual; e ainda tem demonstrado uma melhora na performance do circuito com aumento da velocidade, redução do número de componentes e baixo consumo [13].

Um RTD é um dispositivo de tunelamento - que consiste, em sua forma mais básica, de duas camadas de materiais condutores separados por duas camadas de um isolante muito fino e, ao centro, uma camada de material condutor conhecida como poço quântico como pode ser visto na Fig. 2.1 - que apresenta uma resistência diferencial negativa em sua curva característica corrente-tensão, chamada por sua sigla em inglês de NDR (*negative differential resistance*); visualmente, a característica NDR é a inclinação negativa vista na curva corrente-tensão. A idéia básica é explorar essa característica não linear para implementar novas funções.

Infelizmente, por se tratar de um diodo e, portanto, ter apenas dois terminais, ele não pode implementar operações lógicas sozinho. Entretanto, a NDR dá ao RTD ótimas propriedades de chaveamento e com o projeto correto pode ser usado para criar células de memória, circuitos lógicos e portas lógicas pseudo dinâmicas [14].

Dois RTDs geram um circuito estático biestável, o que significa que diferentemente de circuitos dinâmicos onde um estado lógico é representado por uma carga elétrica em um capacitor, com este

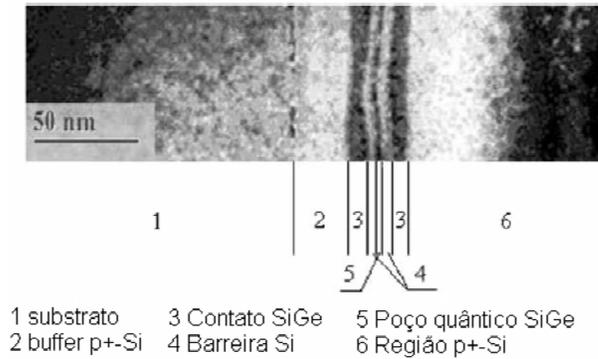


Figura 2.1: Imagem de um corte de seção transversal de um RTD Si/SiGe [2]

circuito o '0' e o '1' lógicos estão em um estado estático, auto-estabilizador. Esta configuração é a mais utilizada entre as aplicações com RTD e é chamado circuito MOBILE (*MONostable-BIstable Logic Element*). A transição monoestável-biestável é usada para chavear o dispositivo do estado baixo para o alto. Ambos os pontos de estabilidade e o ponto metaestável - usado para aplicações muito sensíveis como amplificadores [14] - são apresentados na Fig. 2.2.

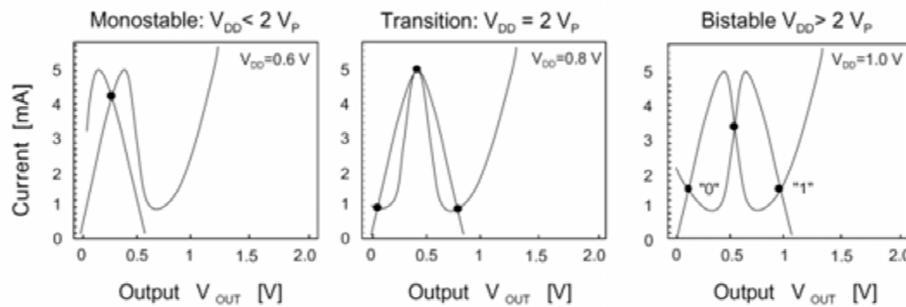


Figura 2.2: Princípio de operação do elemento de transição lógico monoestável-biestável [3]

Já que as propriedades aplicáveis do dispositivo, como o rápido chaveamento, são uma consequência do movimento controlado e desejado dos elétrons no dispositivo, é essencial para os projetistas entender e quantificar o processo de transporte. Atualmente, os modelos e estruturas tratam os elétrons como partículas e os parâmetros de transporte são definidos a partir do movimento de grupos médios de partículas. Como mencionado, tais modelos já não são suficientes para descrever corretamente o que acontece em sistemas nanoeletrônicos e, portanto, a abordagem entrará na teoria quântica de transporte de elétrons passando de processos determinísticos a análise de probabilidades em processos estocásticos [4].

Pode ser visto na Fig. 2.3 um esquema do processo físico que ocorre entre as camadas de materiais de um RTD. Neste processo podemos ver sete diferentes regiões: I e II são chamados de emissor e VI e VII são chamados de coletor, tais regiões são contatos altamente dopados feitos de um semiconductor que possui em sua distribuição eletrônica um pequeno gap, como o GaAs; III e V são as chamadas barreiras quânticas feitas de um semiconductor que possui um gap razoavelmente maior, como o AlGaAs, e em especial possuem um offset positivo da banda de condução em relação

ao semiconductor dos contatos; por último, a região IV é o poço quântico feito de um semiconductor com pequeno gap e é usualmente chamada de base ainda que nenhum tipo de contato elétrico tenha sido feito.

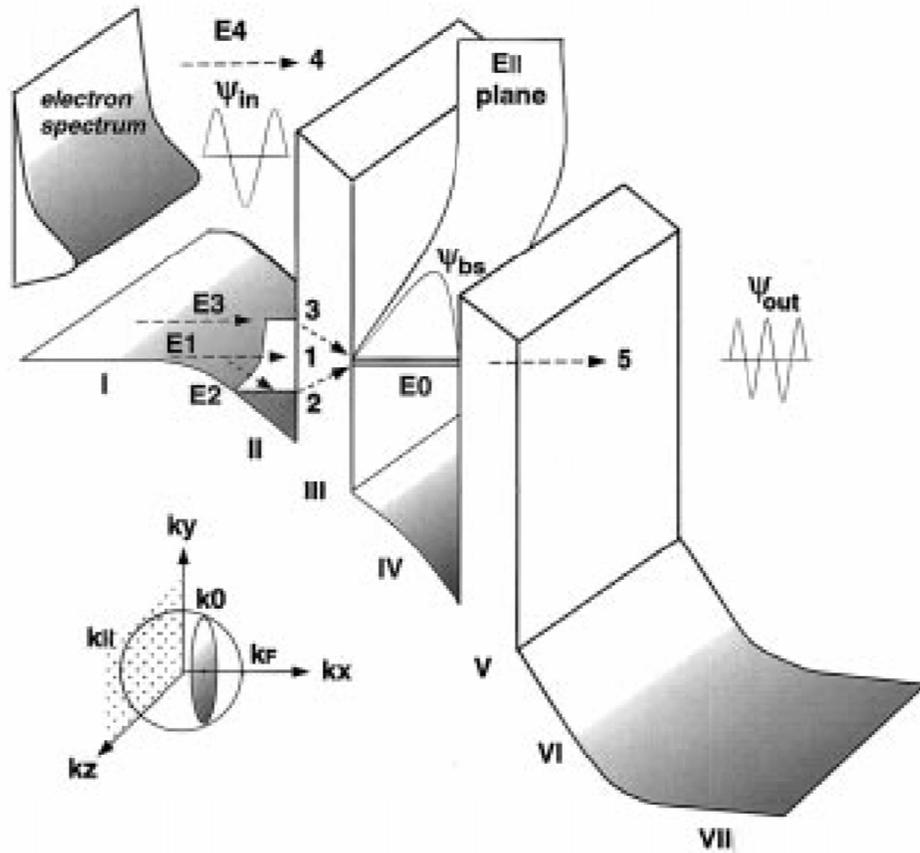


Figura 2.3: Processo de transporte físico através da barreira dupla [4]

Polarizando o RTD encontra-se um espectro de elétrons que passa através da estrutura - da esquerda para a direita - a partir da região I. Considera-se que o espectro eletrônico esteja distribuído de acordo com as estatísticas de Fermi-Dirac tendo os contatos uma baixa resistência devido a alta dopagem negativa - de doadores - de seus semicondutores e uma alta densidade de corrente. Pelas estatísticas de Fermi-Dirac as regiões I e VII são consideradas em equilíbrio térmico graças a interação dos elétrons e o meio que os circunda. Além disso, desconsidera-se a corrente gerada pela incidência de elétrons no lado direito dos contatos já que é muito pequena considerada a polarização aplicada [4].

Os elétrons sofrem múltiplas reflexões na interface graças a sua natureza ondulatória, levando a natureza ressonante do tunelamento. Também existe uma mudança dimensional através dessas interfaces, isto é, a densidade tridimensional dos estados energéticos no emissor versus a densidade bidimensional considerada no poço quântico. As múltiplas reflexões causam interferências construtivas ou destrutivas dependendo do comprimento de onda de um elétron em particular. Para elétrons com comprimentos de onda específicos, nos quais é favorecida a interferência construtiva, pode ser encontrada uma probabilidade de transmissão quase unitária nas energias correspondentes a esses comprimentos. Em outras palavras, o 'tunelamento ressonante' acontece nesses 'níveis res-

sonantes' de energia (que possuem uma espessura finita graças aos mecanismos de espalhamento). Esse processo é indicado na Fig. 2.3 pela seta 1 para um elétron com energia E_1 coincidente com a energia de ressonância E_0 . Outros processos adicionais ao transporte através dos níveis de ressonância podem ser identificados pelas setas 2 e 3. No processo 2, um elétron de energia E_2 da camada de acumulação do emissor, região II que é considerada um poço de potencial bidimensional, pode absorver um fóton e na sequência tunelar através do nível de ressonância E_0 . Analogamente, no processo 3 um elétron com energia inicial E_3 pode perder um fóton e tunelar através da barreira. Além desses processos, não se pode desconsiderar que existem elétrons com energia suficiente, por exemplo E_4 , que podem saltar a barreira através da emissão termiônica como indicado no processo 4. Em estudos notou-se também que existe uma probabilidade pequena que elétrons tunelem mesmo não estando em níveis de ressonância e que essa corrente é uma importante contribuição para a corrente de vale [4].

É importante notar que essa é uma descrição simples e que não envolve muitos outros fatores que fazem da operação do RTD um processo muito mais complexo, em especial pelas interações dos elétrons com o ambiente. Impurezas, vibrações, rugosidades nas interfaces, ondas dispersas pela própria estrutura, entre outros, podem afetar significativamente as propriedades do dispositivo fazendo da modelagem física precisa de um RTD real uma tarefa admirável [4].

Assim, vendo este processo pode-se prever a formação da curva característica corrente-tensão de um RTD. Partindo de zero e aumentando a tensão aplicada, a probabilidade de tunelamento aumenta até um máximo onde todos os níveis inferiores de energia do poço já estão cheios, mas onde a energia não é alta o suficiente para que os elétrons saltem a barreira pela emissão termiônica. Assim, a curva sofre uma queda, conhecida como diferencial negativa, e torna a aumentar pela emissão termiônica que passa a acontecer devido ao valor da tensão sendo aplicada. Na Fig. 2.4 pode ser visto a contribuição de cada uma dessas correntes - a de tunelamento e a emissão termiônica - separadamente, bem como sua junção formando a característica corrente-tensão de um RTD.

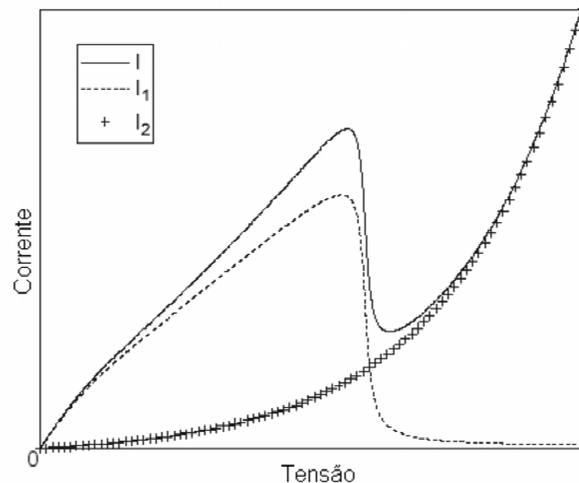


Figura 2.4: Curvas esquemáticas da contribuição da I_1 - corrente de tunelamento, I_2 - corrente emissão termiônica e a curva IV característica I [2]

2.2 Modelagem

O estudo de modelos é essencial para a aplicação prática de circuitos e análise de problemas. Sem estes, os pesquisadores não teriam como prever funcionamentos de circuitos e sua fabricação estaria fadada a métodos de tentativa e erro. Assim, torna-se indispensável a formulação de modelos estáveis e suficientemente precisos do objeto de estudo.

Em eletrônica, a primeira grande separação que acontece ao iniciar-se uma modelagem é a diferenciação entre modelos de grandes e pequenos sinais. Modelos de grandes sinais se preocupam em reproduzir o mais fielmente possível a curva característica corrente-tensão, chamada curva IV. Seus circuitos trabalham com polarizações e entradas relativamente estáveis, ou seja, as mudanças acontecem em uma frequência suficientemente baixa para que em uma aplicação prática o circuito não sofra por problemas de estabilidade. Sua preocupação está em entender o funcionamento do dispositivo e suas possíveis aplicações. Já os modelos de pequenos sinais estão preocupados com a análise em frequência, ou seja, na maneira que o dispositivo responde a variações na frequência estando polarizado em um ponto de operação. Sua preocupação é entender a maneira como a variação da frequência modifica o comportamento do dispositivo.

Durante as últimas décadas vários modelos foram propostos e ainda hoje novos modelos surgem tentando representar cada vez mais precisamente o comportamento dos RTDs. Como dito anteriormente, em nanoeletrônica os processos físicos são extremamente complexos e muitas variáveis podem interferir seriamente em um circuito. Por esse motivo, modelos antigos tem sido aperfeiçoados na tentativa de representar melhor os processos e as interferências externas. Também como consequência dessa complexidade, algumas vezes são propostos modelos mais simples mas com aplicações específicas para que a complexidade não se sobreponha a viabilidade da simulação e fabricação de circuitos e sistemas.

2.2.1 Modelo de grandes sinais baseado em redes neurais de base radial

Redes neurais artificiais podem ser usadas em tarefas de agrupamento, classificação, reconhecimento de padrões, predição e aproximação de funções. Em particular, redes neurais de base radial são amplamente usadas como aproximadores universais de funções [15]. Esta arquitetura de redes neurais é composta de duas camadas, como mostrado na Fig. 2.5.

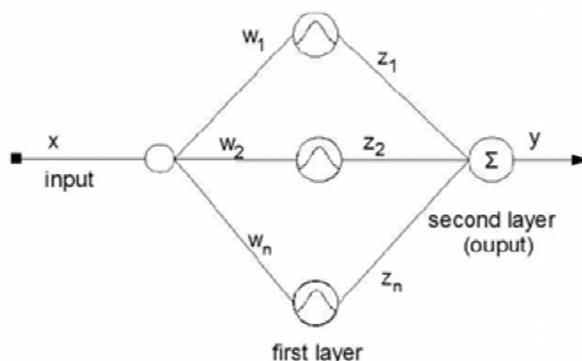


Figura 2.5: Arquitetura da rede neural de base radial

A primeira camada é formada por todas as n entradas (W_1, W_2, \dots, W_n), sendo cada uma ligada a todos os neurônios. Nesta camada, a função de ativação são funções de base radial, ou seja, gaussianas. Essas funções de ativação $f(x)$ podem ser escritas como:

$$f(s_j) = \exp \left[\frac{-(s_j - K_e)}{2\sigma^2} \right] \quad (2.1)$$

onde K_e e s são parâmetros relacionados ao valor médio e a constante de espalhamento da gaussiana. As entradas para a primeira camada s_j são dadas pela expressão:

$$s_j = \sum_{i=1}^n x \cdot w_i \quad (2.2)$$

A segunda camada tem uma função de ativação linear dada por:

$$y = \sum_{i=1}^n z_i \quad (2.3)$$

Em geral, redes neurais de base radial são utilizadas quando há um mapeamento complexo e não-linear cujo modelo é desconhecido, mas existem informações sobre entradas e saídas. Mesmo para modelos conhecidos, redes neurais ainda são uma alternativa válida considerando sua redundância, e assim robustez, e tolerância ao ruído [15].

Modelar dispositivos utilizando redes neurais significa utilizar-se dos dados experimentais obtidos para oferecer como resposta uma rede neural que tenha, nos pesos e em sua própria estrutura, toda a informação para a obtenção da curva IV [1].

2.2.2 Modelo de grandes sinais baseado na estrutura e processos físicos

Na área científica, após pesquisas de procedimentos de aproximação de curvas baseadas em equações matemáticas puras - como a aproximação linear por partes, utilização de polinômios entre outros - foi concluído que tais aproximações não condiziam com o nível de precisão, nem com a simplicidade requerida para trabalhar com sistemas mais complexos. Assim, trabalhando com as características físicas dos materiais, descobriu-se que existe uma expressão natural derivada diretamente do modelo quântico que é simples e gera uma excelente aproximação para os dados. A expressão contém parâmetros físicos que podem também ser tratados como parâmetros empíricos para a melhor aproximação [5]. Por sua característica flexível, modelos desse tipo permitem a incorporação de camadas para uma melhor aproximação dos efeitos físicos.

Assim, através da equação física abaixo, modelada por Schulma, De Los Santos e Chow - considerando a mesma notação utilizada por eles onde E_r é a energia do nível de ressonância medido relativamente ao ponto central do fundo do poço quântico e Γ sendo a largura de ressonância - para temperaturas T diferentes de zero e estatística de Fermi-Dirac tem-se:

$$J = \frac{em^*kT\Gamma}{4\pi^2\hbar^3} \ln \left[\frac{1 + e^{(E_F - E_r + eV/2)/kT}}{1 + e^{(E_F - E_r - eV/2)/kT}} \right] \cdot \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{E_r - \frac{eV}{2}}{\frac{\Gamma}{2}} \right) \right] \quad (2.4)$$

A partir desses parâmetros físicos foi feita uma substituição para utilizar-se a equação com parâmetros matemáticos. Estes parâmetros podem ser modificados para melhor aproximação dependendo do dispositivo RTD utilizado e, além disso, foi adicionada uma nova equação que representa a equação familiar do diodo que modela o dispositivo após a NDR. Ao final tem-se J_1 como a densidade de corrente de tunelamento e J_2 como a densidade de corrente termiônica [5]. Assim:

$$J_1(V) = A \ln \left[\frac{1 + e^{(B-C+n_1V)e/kT}}{1 + e^{(B-C-n_1V)e/kT}} \right] \cdot \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{C - n_1V}{D} \right) \right] \quad (2.5)$$

$$J_2(V) = H(e^{n_2eV/kT} - 1) \quad (2.6)$$

$$J(V) = J_1 + J_2 \quad (2.7)$$

O resultado encontrado em [5] está ilustrado pela Fig. 2.6 na qual encontra-se a curva teórica e a curva de dados experimentais.

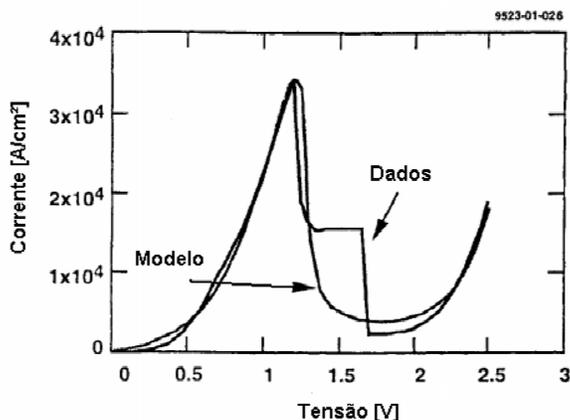


Figura 2.6: Curva IV encontrada por Schulman et al. em [5] modificado

Essa abordagem é utilizada com uma grande gama de dispositivos e suas equações são simplesmente incorporadas a programas de simulação como o SPICE para serem testados. A dificuldade está na resolução de equações tão complexas quando comparadas com outras utilizadas em microeletrônica, e mais ainda quando deve-se encontrar os valores para os diversos parâmetros. Infelizmente, por se tratar de um modelo simplificado os valores reais de massa, energia de Fermi, entre outros, são tratados apenas como valores iniciais na tentativa de aproximação dos dados. Ao final, muitas vezes alguns parâmetros têm valor bem diferente daquele proposto.

Entretanto, com modelos mais complexos, os modelos físicos são muito interessantes quando se fala em predição de curvas a partir da fabricação já que pode-se ajustar os parâmetros estruturais e suprimir os processos indesejados através do design e otimização do dispositivo [4].

2.2.3 Modelo de grandes sinais baseado em elementos de circuito

Para compreender melhor os novos dispositivos e entender como eles se comportam para então prever suas reações e possíveis aplicações, é usual tentar modelá-los a partir de outros elementos de circuitos conhecidos. Esse tipo de modelagem permite que problemas encontrados em outras simulações sejam mais rapidamente encontrados e solucionados devido a similaridade de certas partes do circuito com outros já testados para diferentes dispositivos.

No trabalho com RTDs a dificuldade encontra-se em reproduzir a região diferencial negativa. Muitas tentativas foram feitas e, em sua maioria, utilizam chaves controladas por tensão ou corrente. Alguns modelos chegam a usar seis chaves além de resistores, capacitores e fontes de tensão [16]. O modelo encontrado que mais se aproximou do compromisso entre simplicidade, facilidade na extração dos parâmetros e aproximação da curva experimental foi ilustrado por Dan Neculoiu e Teodor Tebeanu em seu trabalho *Spice Implementation of Double Barrier Resonant Tunnel Diode Model* [6]. Seu modelo propõe um circuito que possui duas partes, cada uma modelando uma das duas principais correntes que atravessam o RTD: a corrente de tunelamento e a corrente termiônica. No esquema da Fig. 2.7 vê-se dois ramos, a corrente de tunelamento é modelada pelo ramo superior e a corrente termiônica pelo ramo inferior. O primeiro é especialmente importante para a primeira parte da simulação onde a tensão vai de zero até o vale após a diferencial negativa e o segundo é significativo apenas após o vale.

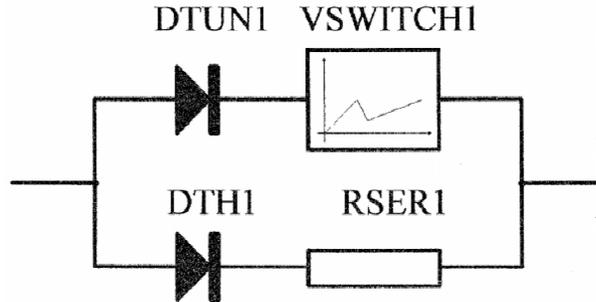


Figura 2.7: Esquemático do modelo proposto por Neculoiu et al. em [6]

A extração dos parâmetros é feita diretamente da curva experimental para a corrente termiônica e utilizando-se das relações abaixo e dos valores experimentais para a corrente de tunelamento.

$$V_{on} = V_p - \frac{NkT}{q} \ln \left(\frac{I_p}{I_s} + 1 \right) \quad (2.8)$$

$$R_{on} = \frac{V_{on}}{I_p} \quad (2.9)$$

$$V_{off} = V_v - \frac{NkT}{q} \ln \left(\frac{I_v}{I_s} + 1 \right) \quad (2.10)$$

$$R_{off} = \frac{V_{off}}{I_v} \quad (2.11)$$

Sendo N o parâmetro que define o tipo de diodo, q a carga do elétron, V_p a tensão e I_p a corrente no pico da curva e V_v a tensão e I_v a corrente no vale da curva.

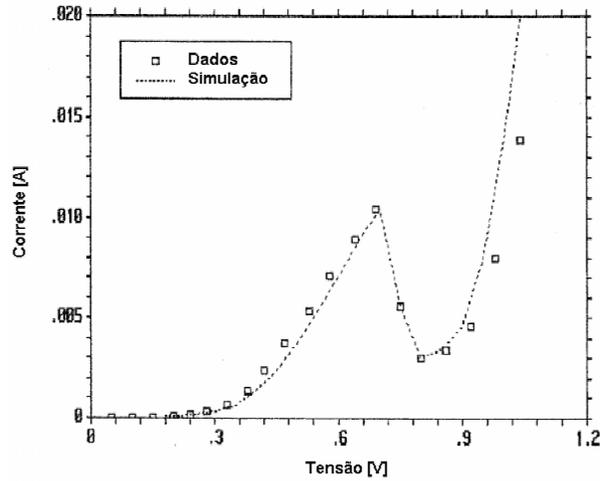


Figura 2.8: Curva IV encontrada por Dan Neculoiu e Teodor Tebeanu em [6] modificada

2.2.4 Modelo de pequenos sinais baseado em elementos de circuito

A modelagem de pequenos sinais, como dito anteriormente, se preocupa em analisar e reproduzir o comportamento do dispositivo quando se depara com entradas AC. O RTD é conhecido por sua alta capacidade de chaveamento para uma grande banda de frequência e por isso a sua análise de pequenos sinais é tão importante para as pesquisas e para a indústria.

O modelo definido por Miles et al. em [7] possui 3 resistências, 3 capacitâncias e 1 indutância implementadas de acordo com a Fig. 2.9(a) e trabalha, de acordo com seus criadores, para uma frequência entre 45MHz e 12GHz.

Aplicada a tensão nos terminais do RTD, o campo elétrico leva cargas negativas para o poço quântico e para algumas regiões de acumulação que são representadas aqui, respectivamente, pelos capacitores C_w e C_a juntos com R_b que representa a resistência da barreira mais próxima ao catodo. O resistor R_c é associado ao caminho através do dispositivo e é ele que assume valores negativos na região diferencial negativa. Alguns componentes tem valores que são independentes da frequência na faixa medida - R_p , L_p e C_p que são atribuídos a elementos parasitários (vide Tab. 2.1) -, mas os resistores R_b e R_c e os capacitores C_w e C_a não. A variação dos valores desses componentes é representada pela Fig. 2.9(c) e (d) enquanto 2.9(b) representa a curva IV característica.

Tabela 2.1: Valores constantes para os elementos parasitários

Elemento	Valor
R_p	$0,5\Omega$
L_p	$0,3nH$
C_p	$0,2pF$

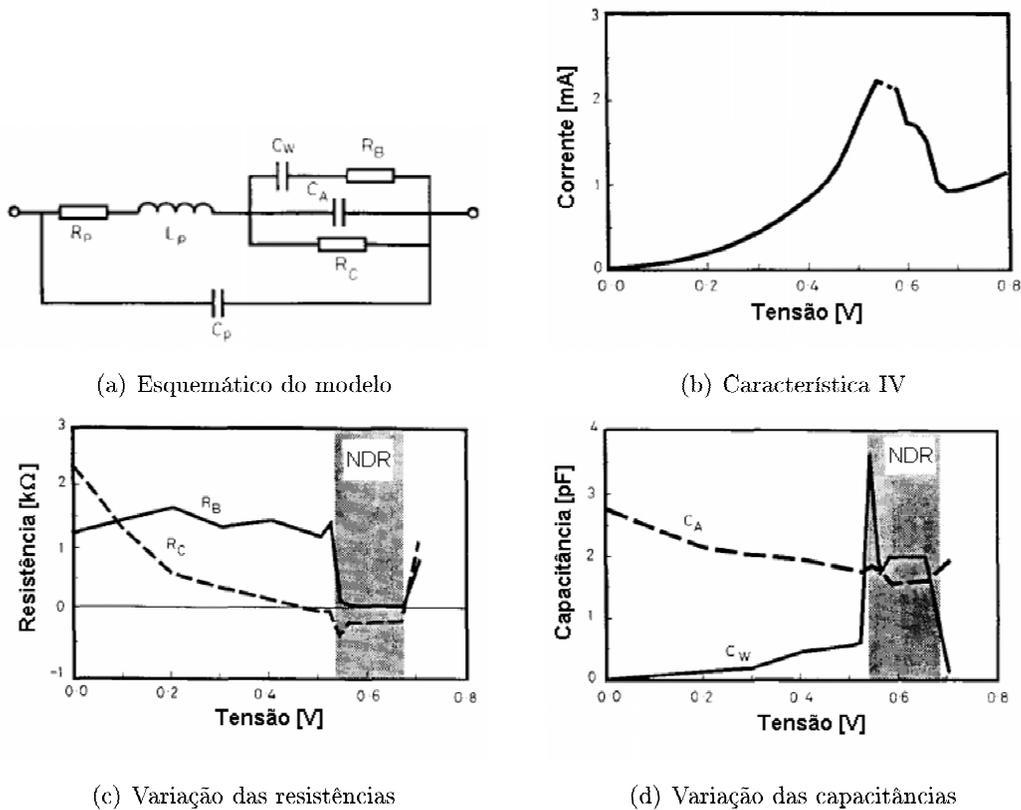


Figura 2.9: Modelo apresentado por Miles et al. em [7]

2.3 Programas de simulação

2.3.1 MATLAB

O MATLAB (*MATrix LABoratory*) é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Suas matrizes permitem a resolução de problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagens tradicionais. Já o Simulink é uma ferramenta para modelamento, simulação e análise de sistemas dinâmicos com uma interface básica de diagramação por blocos e bibliotecas. Por fim, SimElectronics é uma toolbox apresentada pela Mathworks que apresenta não apenas ferramentas para trabalhar com simulação de circuitos mas também uma interface gráfica ligada a ela [17, 18].

2.3.2 SPICE

SPICE (*Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis*) é um software de simulação de circuitos analógicos desenvolvido no ano de 1975 pelos pesquisadores Larry Nagle e Donald Petterson na Universidade da Califórnia, campus de Berkeley [19]. LTspice é uma versão não-comercial livre do Spice para trabalhos em Microsoft Windows e Linux.

Capítulo 3

Metodologia

"Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível"

São Francisco de Assis

3.1 Metodologia

Para chegar ao objetivo de simular circuitos com diversos modelos de RTDs muitos passos análogos foram tomados para as modelagens escolhidas. Para facilitar a visualização e entendimento do processo, um fluxograma foi montado e pode ser visto na Fig. 3.1. Partindo da problemática inicial de como melhor pode-se simular e modelar um RTD chegou-se a escolha uma nova abordagem em grandes sinais tratada a partir de redes neurais. Esse novo modelo foi implementado a partir de rotinas do MATLAB e apresentou resultados interessantes. Similarmente, novos modelos foram escolhidos, desta vez modelos mais consolidados e de metodologia conhecida, e foram reproduzidos. Cada modelo passou por uma série de testes e verificações até chegar a suas curvas de validação positivas. Levou-se em consideração parâmetro como: fidelidade aos dados experimentais, facilidade de reprodução pela apresentação de todos os parâmetros necessários por seus autores originais, facilidade de aplicação dos mesmos com novos RTDs que não aqueles do próprio artigo, entre outros.

Com os modelos prontos e verificados, vários circuitos foram analisados para a escolha de um que pudesse ser coerentemente testado entre todos. Um dos principais parâmetros aqui considerados foi a utilização do circuito na bibliografia pesquisada. Foi de grande interesse que o circuito simulado fosse amplamente utilizado, se não sozinho ao menos como parte integrante de uma arquitetura. Os modelos então foram testados utilizando rotinas do MATLAB versão R2009a - para o modelo de redes neurais e o baseado na análise físico-matemática - e a versão 4.03b do simulador LTspice - para o modelo de circuitos.

Tendo-se os resultados positivos da implementação do circuito pelos modelos de grandes sinais, uma análise individual foi feita e, ao final, uma comparação analítica e de tempos de processamento foi concluída.

Partindo para a segunda problemática em que a aplicação atual dos RTDs se baseia em circuitos de alta frequência e uma análise de pequenos sinais torna-se indispensável, mais um modelo foi testado. Aqui interessou aplicar ao circuito simulado para os modelos de grandes sinais uma entrada AC que, como sabido, geraria uma porta lógica inversora. Esta aplicação foi simulada em ambiente Simulink com a ajuda da toolbox SimElectronics do MATLAB versão R2009a. Ao final, foi feita uma comparação entre o circuito simulado e a bibliografia pesquisada, concluindo este trabalho.

Todas as simulações foram feitas em um processador Intel Centrino utilizando 1Gb de memória RAM.

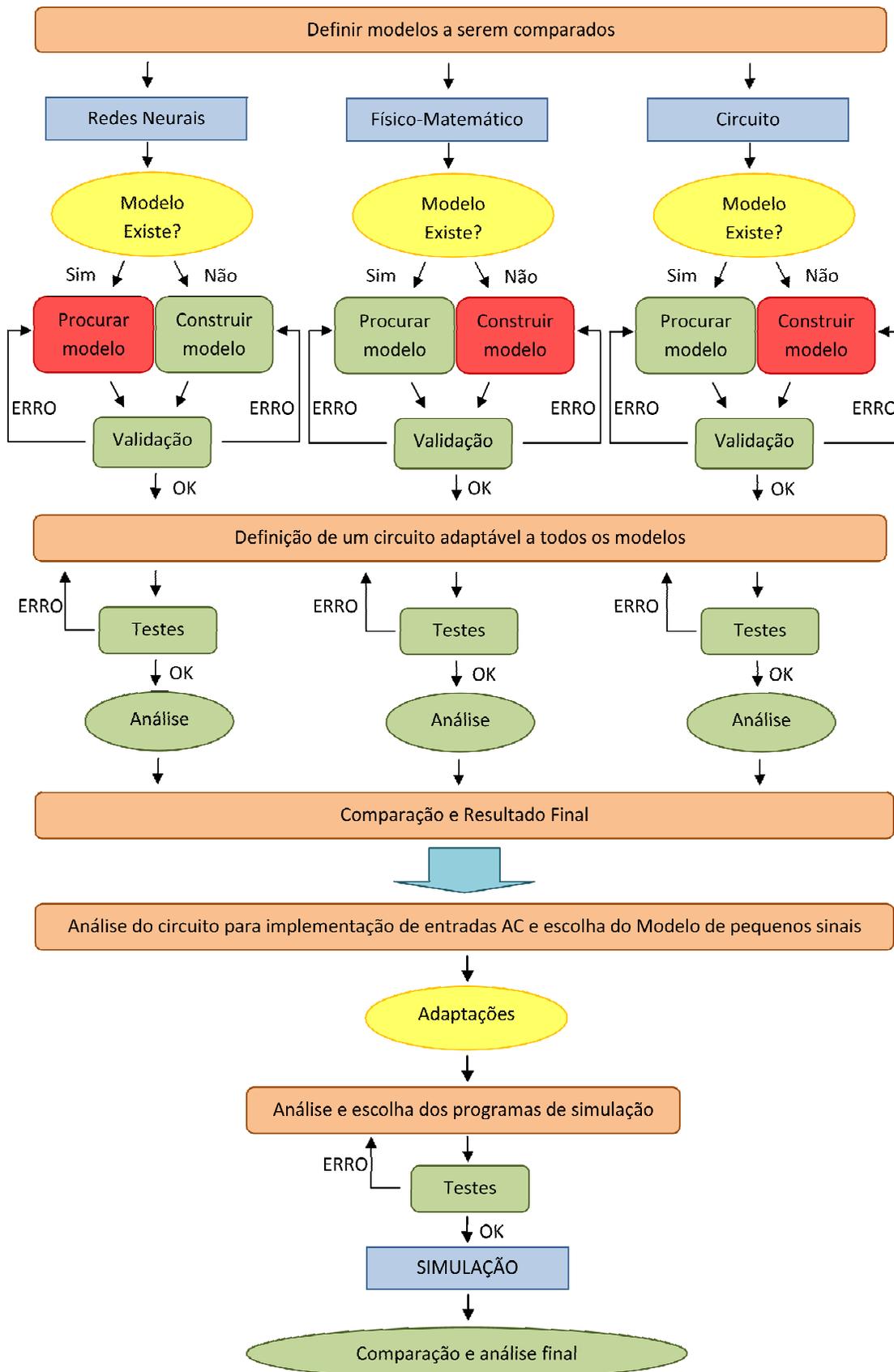


Figura 3.1: Esquema metodológico deste projeto

Capítulo 4

Resultados Experimentais

"Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo para vencer é tentar mais uma vez"

Thomas Edison

4.1 Resultados

Como esquematizado na metodologia, o primeiro passo foi definir os modelos a serem comparados. O modelo de redes neurais, por se tratar de uma inovação, apresenta uma dinâmica um pouco diferente das demais. Nas seções seguintes vê-se a linha de raciocínio para cada modelo.

4.1.1 Modelos de grandes sinais

Por se tratar de um modelo novo, o modelo baseado em redes neurais teve uma validação um pouco diferente das demais. Era necessário que este modelo funcionasse para dados experimentais vindos diretamente de um equipamento de medidas e, portanto, de uma fonte conhecida e confiável. Pela dificuldade em obter dados experimentais de um RTD real para a validação da rotina MATLAB feita para a simulação, utilizou-se os dados de um dispositivo de camada única de óleo de buriti criado no Laboratório de Dispositivos e Circuitos Integrados em [12]. A escolha do dispositivo incluiu especialmente a análise do comportamento da curva IV, que neste caso apresenta uma região diferencial negativa como um RTD.

Pela rotina MATLAB criada (vide Anexo I), uma rede neural é treinada por funções de ativação de base radial tendo como entradas os dados extraídos de uma curva ou os dados experimentais retirados diretamente de um instrumento de medida. A rotina gera um bloco de testes que é visto na Fig. 4.1 e apresenta as características explicadas na Seção 2.2.1: uma arquitetura de rede neural composta de duas camadas. Diferentemente de outros modelos, a informação passa a ser armazenada nos pesos dos neurônios e não mais em variáveis ou componentes.

Aplicando-se os dados experimentais obtidos para o dispositivo de camada única ao modelo, encontra-se o resultado da Fig. 4.3(a). Com esta curva foi possível validar o modelo para uma situação real.

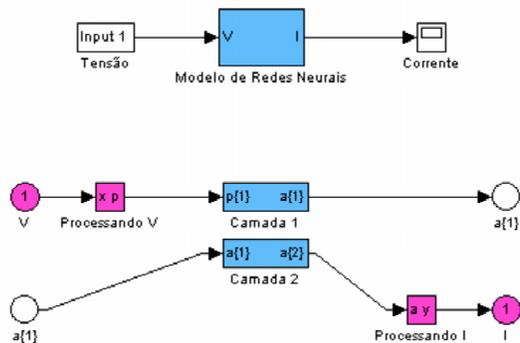


Figura 4.1: Apresentação do bloco de trabalho do modelo de redes neurais

Com as curvas experimentais de vários artigos científicos pesquisados foi possível criar uma biblioteca de RTDs modelados pelas redes neurais. Os resultados encontram-se no Anexo I e são representados pelas curvas IV de cada dispositivo.

Uma vez terminado esse trabalho, os dois outros modelos - baseado nas características e transporte físico e baseado em elementos de circuito - foram reproduzidos e validados. O modelo físico-matemático necessitou apenas de uma rotina MATLAB simples para implementar a função dada por [5]. Enquanto o modelo de circuitos utilizou-se do simulador LTspice para reproduzir o esquemático proposto por [6]; o esquemático encontra-se na Fig. 4.2 enquanto que a netlist e a especificação dos modelos dos elementos pode ser vista no Anexo I.

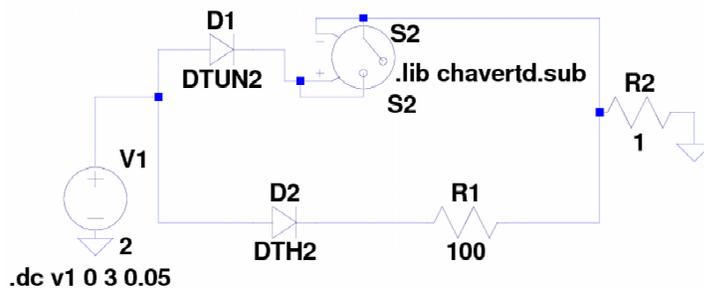
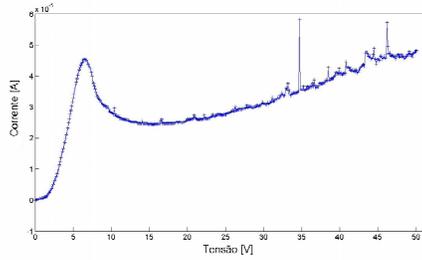


Figura 4.2: Esquemático implementado no LTspice para a simulação do modelo de circuitos

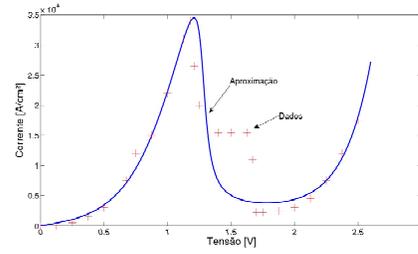
As curvas de validação estão representadas nas Figs. 4.3(b)e(c).

Tendo os modelos em mãos, buscou-se utilizar uma das curvas para fazer a simulação para todos os modelos e assim fazer mais consistente a análise final. Pelo modelo baseado nas características físicas ser o mais difícil na extração de parâmetros utilizou-se a sua curva para as simulações com os outros dois modelos. A metodologia de retirada dos pontos da curva e simulação da rede neural foram utilizados imediatamente para o primeiro modelo. Enquanto isso, para o modelo de circuitos foi necessário modificar quase todos os parâmetros dos elementos do esquemático.

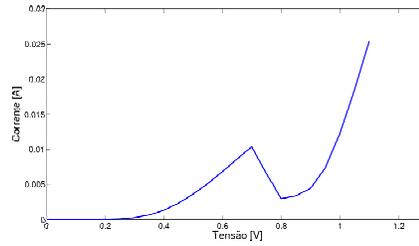
Analisando a curva de dados experimentais (Fig. 2.6) e, considerando-se que o modelo está definido para elementos de circuito com características habituais, retirou-se os parâmetros do circuito que calcula a corrente termiônica; depois, utilizando-se das Eqs. 2.8 a 2.11 e dos valores



(a) Redes Neurais



(b) Físico-Matemático



(c) Circuitos

Figura 4.3: Curvas IV de validação dos modelos. + representam os dados e as curvas são as aproximações geradas.

encontrados na primeira parte foram encontrados os valores para os parâmetros do circuito da corrente de tunelamento. Todos os valores são apresentados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1: Resultado do cálculo dos parâmetros

Corrente termiônica	Valor	Corrente de tunelamento	Valor
I_s	$10 \mu A$	I_p	$34 \cdot 10^3 A/cm^2$
n	2	V_p	1,2 V
RSER1	5Ω	V_{on}	1,0161 V
I_v	$5 \cdot 10^3 A/cm^2$	R_{on}	299 Ω
V_v	1,7 V	V_{off}	1,6073 V
T	300 K	R_{off}	3,22 k Ω

Os resultados das simulações de todos os modelos foram colocados juntos na Fig. 4.4 para facilitar a visualização comparativa. As contribuições de cada uma das correntes modeladas (de tunelamento e termiônica) que são modeladas separadamente nos modelos físico-matemático e de circuitos são verificadas na Fig. 4.6 Além disso, os tempos de simulação médio encontram-se na Tab. 4.2. Pela necessidade de treinamento das redes neurais, seu modelo necessitou de um tempo adicional, apenas antes da primeira simulação, de 0,355744s.

Como será discutido no próximo capítulo, o modelo de circuitos foi aquele que apresentou maior discrepância entre aproximação e dados experimentais. Em uma tentativa de melhorar a aproximação, os parâmetros escolhidos para a chave controlada foram modificados para melhor se adaptar ao contorno da curva corrente-tensão. Os dados, a curva calculada com a metodologia proposta por [6] e a nova curva são mostradas na Fig. 4.12.

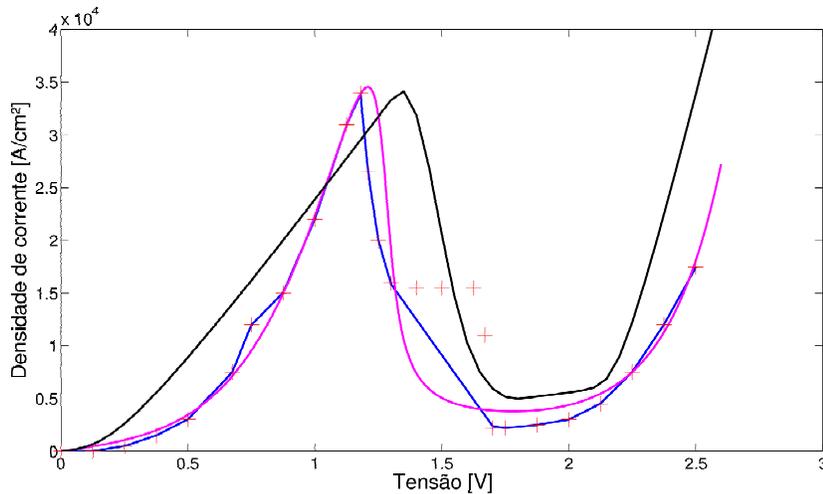


Figura 4.4: Curvas IV para cada um dos modelos; Redes neurais (azul), Físico-Matemático (rosa) e de Circuitos (preto) - '+' dados experimentais

Tabela 4.2: Tempos médios de simulação para cada modelo

Modelo	Simulador	Tempo médio
Redes Neurais	MATLAB	0,113302s
Físico-Matemático	MATLAB	0,025567s
Circuitos	LTspice->MATLAB	≈0,02s

Para levar estes modelos a uma situação real de simulação, escolheu-se o circuito MOBILE, por se tratar da célula básica de simulação para quase todos os circuitos baseados em RTDs. O esquemático desta configuração pode ser visto na Fig. 4.5 e o resultado dos diversos modelos nas Figs. 4.8, 4.9, 4.10. O funcionamento do circuito resume-se a modificar a polarização do circuito tendo como entrada uma tensão no ponto de intersecção dos RTDs - seja aplicação direta seja utilizando-se um transistor para desacoplar a entrada. Três pontos de polarização são importantes: menor que $2V_p$, igual a $2V_p$ e maior que $2V_p$ - sendo $2V_p$ igual a duas vezes a tensão de pico do modelo, neste caso $V_p=1,2V$. Estes três pontos são aqueles que demonstram, respectivamente, as características monoestável, transição e biestabilidade do sistema mostrados nos respectivos gráficos. Ainda que de maneira confusa, a Fig. 4.11 mostra a junção de todas as curvas biestáveis dos modelos, nela pode-se observar os erros que os modelos, em especial o de circuitos, geram sobre a localização dos pontos de estabilidade.

4.1.2 Modelo de pequenos sinais

A aplicação de RTDs em circuitos de alta frequência foi um dos principais motivos pelos quais esses dispositivos ficaram reconhecidos no mundo científico. Sua aplicação mais básica é o circuito inversor modelado com 2 RTDs e 1 transistor n-mos. Para a simulação foi necessário a análise da variação dos parâmetros discutidos na seção 2.2.4. Um resumo de quatro pontos de polarização do

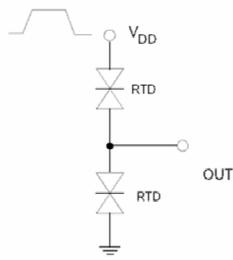


Figura 4.5: Esquema de um circuito MOBILE utilizando RTDs

circuito em [7] são mostrados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3: Valores dos parâmetros para quatro pontos de polarização do modelo de pequenos sinais

Parâmetro	0,2V	0,5V	0,6V	0,7V
Rb	1,6k Ω	1,2k Ω	0 Ω	0,55k Ω
Rc	0,6k Ω	<50 Ω	-0,75k Ω	0,75k Ω
Ca	2,15pF	1,8pF	1,52pF	1,9pF
Cw	0,15pF	0,58pF	2pF	0,2pF

O esquemático montado e as entradas e saídas do circuito são mostrados na Fig. 4.7. A entrada é uma onda quadrada que varia entre 0 e 1V e frequência de 50MHz. A polarização foi mantida constante durante todo o processo em 1,4V. O tempo de simulação médio foi de 0,009139s. Assim, em relação ao tempo de processamento, pode-se fazer uma comparação apenas com o trabalho de Le et al. que apresenta dois tempos de processamento: um para o método de integração ACES (*Adaptively controlled explicit integration method*) e o segundo para o simulador HSPICE (versão comercial de simulador baseado na tecnologia SPICE). Os valores comparativos encontram-se na Tab. 4.4, que mostram a rapidez do processamento pelo algoritmo do MATLAB.

Tabela 4.4: Valores comparativos do tempo de simulação entre três métodos de simulação do circuito inversor

HSPICE	ACES	MATLAB
32,5s	0,25s	0,009139s

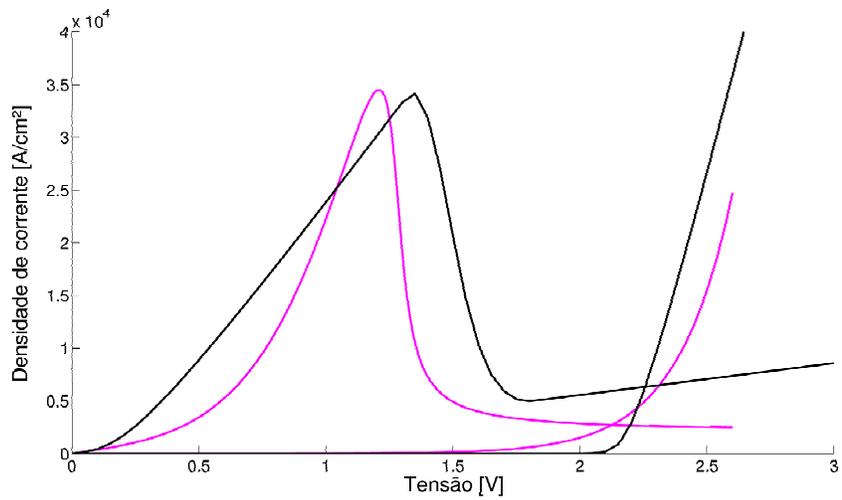
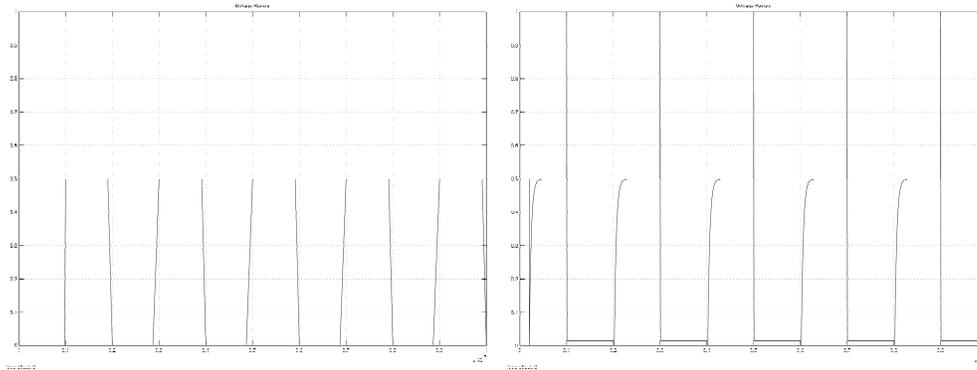
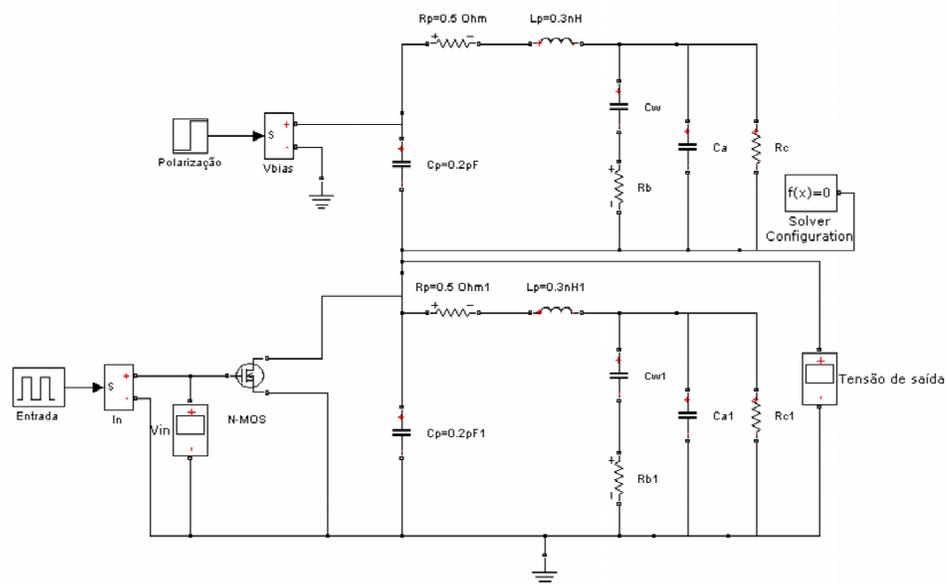


Figura 4.6: Contribuição da corrente de tunelamento e da corrente termiônica para os modelos físico-matemático (rosa) e de circuitos (preto)



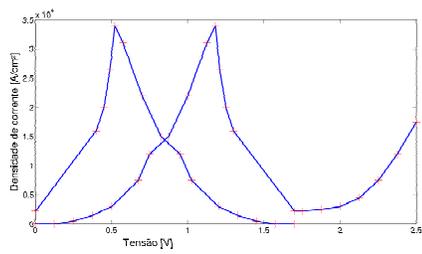
(a) Entrada

(b) Saída

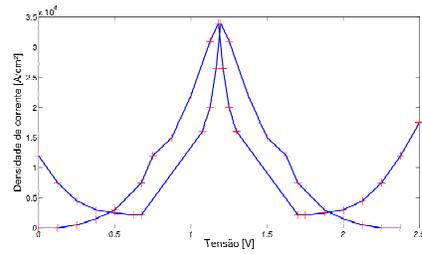


(c) Esquemático

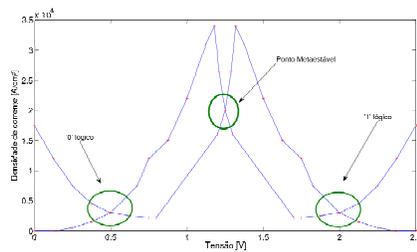
Figura 4.7: Funcionamento do circuito inversor polarizado com $V_{dd}=1\text{V}$



(a) Característica monoestável

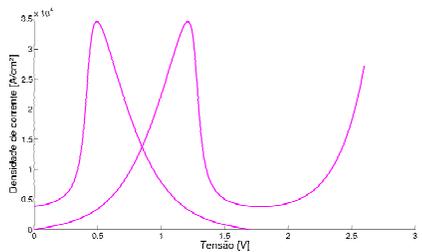


(b) Transição

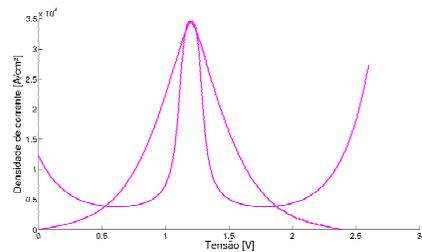


(c) Característica biestável

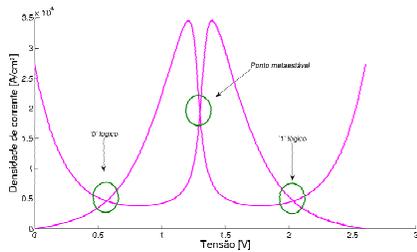
Figura 4.8: Saída do circuito MOBILE para o modelo de Redes Neurais



(a) Característica monoestável

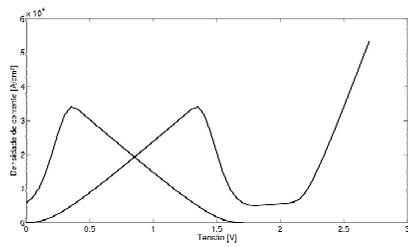


(b) Transição

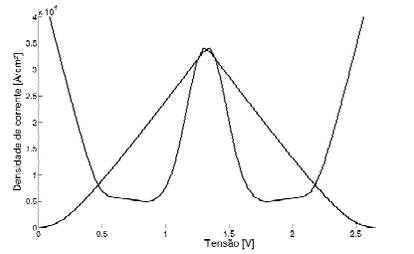


(c) Característica biestável

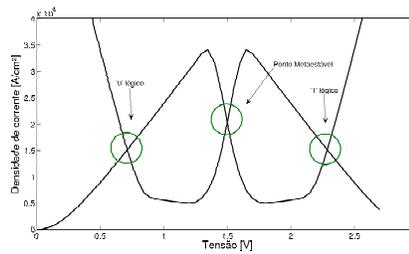
Figura 4.9: Saída do circuito MOBILE para o modelo Físico-Matemático



(a) Característica monoestável



(b) Transição



(c) Característica biestável

Figura 4.10: Saída do circuito MOBILE para o modelo de Circuitos

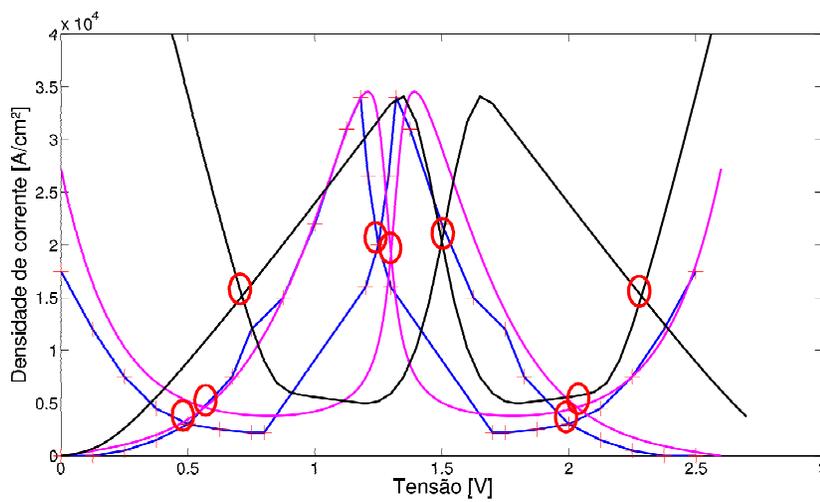


Figura 4.11: Gráfico do comportamento biestável de todos os modelos

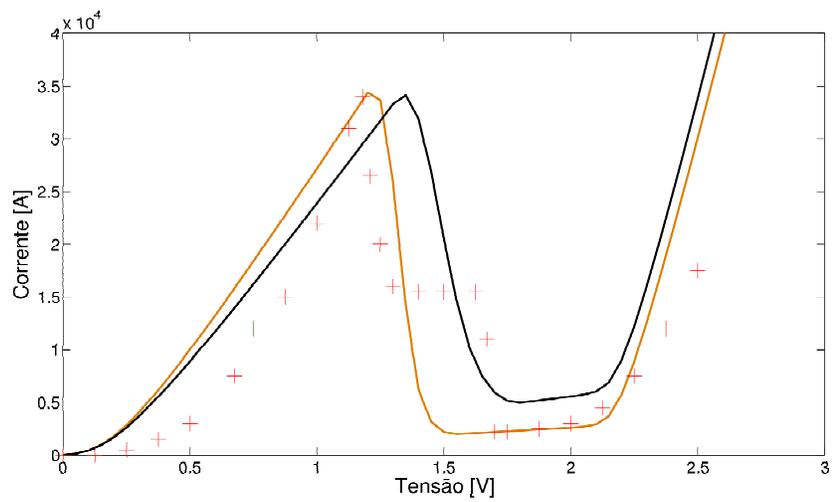


Figura 4.12: Aproximação do modelo de circuitos gerada depois de manipulação dos parâmetros. '+' dados experimentais, 'preto' antiga proposta de aproximação, 'marrom' nova proposta

Capítulo 5

Análise dos resultados

5.1 Modelos de grandes sinais

Para os modelos de grandes sinais, grande parte de todo o trabalho foi feito tendo como base os dados de Schulman et al. em [5]. Sua escolha, como foi dito e será ainda aprofundado, baseou-se na dificuldade em reproduzir o modelo físico-matemático para outros RTDs. Entretanto, é fácil notar em seus dados que existe um primeiro problema a ser analisado: o fato da curva IV apresentar uma região de platô chamada na literatura de característica "plateaulike". Vários estudos foram focados no efeito das oscilações instáveis de circuito para a medida da característica IV dos RTDs e descobriu-se que, quando polarizado na região NDR e alguns critérios de medida são alcançados, ocorre um fenômeno de instabilidade ou característica "plateaulike" na região NDR ao invés da obtenção de uma curva estável e contínua [5, 20]. Os estudos geraram novas formas de medida e circuitos de apoio que minimizaram este fenômeno e fizeram possível as medidas reais da característica IV dos dispositivos [20]. Neste trabalho a região de platô será desconsiderada.

Analisando as validações dos modelos e sua simulação com os dados de [5] vê-se que o modelo baseado em redes neurais apresenta a maior fidelidade em relação aos dados experimentais. Sua aproximação chega quase a perfeição por incluir em sua curva todos os pontos experimentais. Seu aspecto visual lembra sistemas lineares por partes o que levaria a problemas de derivação. Entretanto, analisando a curva suave da Fig. 4.3 de validação vê-se que o problema encontra-se na baixa densidade de pontos extraídos do modelo em [5]. Ainda analisando a mesma figura vê-se a consequência de tamanha precisão na aproximação: o modelo não é capaz, por si só, de ignorar ruídos e conta tais pontos como partes dos dados. Assim, pode-se concluir que o modelo de redes neurais será tão preciso quanto forem seus dados experimentais. Por um lado é uma grande vantagem não precisar saber tantas informações sobre o dispositivo e ainda sim ser capaz de modelar sua curva característica IV; este modelo mostrou-se, já na sua validação, capacidade de adaptação mesmo a dispositivos desconhecidos graças às características da própria rede neural de base radial. Entretanto, no estado atual, uma vez simulado, o modelo não consegue prever comportamentos de estruturas parecidas nem é muito flexível em relação a mudanças na curva IV, pois se trata de simulações com dados reais já medidos, seria necessária uma mudança direta nos dados para tal modificação. Um exemplo disso é a desconsideração (treinamento e simulações) da

região "plateaulike" que afeta de maneira mais visível este modelo, pois como já explicado, este usa puramente os dados experimentais para gerar sua curva e, então, não é capaz de prever a região de vale (entre a NDR e a segunda região diferencial positiva) que é característica do dispositivo. Sua aplicação em ambiente de simulação foi a tarefa mais difícil entre os três modelos. Por ser novidade, não há compatibilidade de sua metodologia com nenhum simulador e, mesmo o MATLAB, encontra dificuldades em trabalhar com a toolbox de redes neurais em conjunto com outros ambientes. Em uma tentativa de inserir o modelo dentro de um dos dispositivos da nova toolbox Simelectronics o resultado não foi positivo. A nova toolbox não suporta os comandos de geração de redes neurais e, tampouco é possível gerar a rede fora da toolbox e importar os valores finais. Por fim, pode-se tentar analisar o modelo de redes neurais com uma espécie de tabela de dados, onde existem os dados de entrada e qual seu valor de saída. Mas, diferentemente desse processo discreto, o modelo preenche os espaços entre os pontos gerando uma "tabela" contínua de valores de entrada e saída.

O modelo baseado nas características físicas tem a segunda melhor aproximação aos dados e apresenta uma curva suave, livre de pontos de não-diferenciação. O ponto mais forte de seu modelo é o fato de poder prever-se o comportamento de um RTD ainda não fabricado. É certo que ainda não é possível utilizar-se os parâmetros físicos puramente para a simulação e que um certo ajuste matemático deva ser feito para cada RTD da biblioteca, mas a própria concepção do modelo permite adicionar parâmetros para fazer deste mais realista. Seus próprios criadores já previam esse comportamento e ilustram, entre outros, a adição de um termo para indicar a diminuição do pico de transmissão Lorentziano quando a tensão aplicada chega a condição de ressonância [5]. Quanto mais parâmetros, maior a fidelidade da aproximação, porém maior também a complexidade da equação e diminui sua praticidade em relação a incorporação em ambientes de simulação. Assim, levando em conta o compromisso complexidade-aproximação, o modelo demonstrou-se suficientemente preciso para as aplicações práticas e, além disso, por se tratar de uma metodologia conhecida, sua aplicação em ambientes de simulação é mais imediata. O maior problema é a extração de parâmetros para aplicação no modelo. Sem conhecer as características de fabricação, tentar aproximar dados com esse modelo torna-se uma tarefa formidável e, além disso, perde-se o próprio conceito do modelo, que é basear-se nas características físicas para a partir daí realizar as aproximações necessárias mudando os parâmetros físicos em matemáticos, e não em um puro método de tentativa e erro.

Por fim, o modelo baseado em elementos de circuito combina a simplicidade de uma metodologia conhecida e a extração didática dos parâmetros através das curvas experimentais. O mais interessante neste tipo de modelo é a facilidade da compreensão do dispositivo apenas analisando o esquemático. Aqui também existe a facilidade de colocar e retirar componentes para melhorar a aproximação aos dados. Um problema óbvio é depender uma análise nanoeletrônica, de dispositivos microeletrônicos. Estes dispositivos, por suas próprias características, podem gerar nos circuitos certos fenômenos que não são próprios do RTD e sim da dinâmica deles. Isso se reflete nos próprios simuladores que ainda não se encontram plenamente preparados para simulações em escala nano. Vários trabalhos, inclusive, tentam melhorar estes programas criando novas versões ou incluindo novos pacotes como em [16, 21]; infelizmente, pela dificuldade de reprodução destas rotinas, elas fogem ao escopo deste trabalho. A implementação deste modelo, também dentro das novas toolboxes do MATLAB, foi testada. Nenhuma das duas propostas conseguiu atingir seu objetivo: a

primeira que se tratava de reproduzir com a toolbox Simelectronics os elementos do circuito, não conseguiu realizar a simulação por não possuir uma chave compatível com a requerida, de maneira análoga tentou-se uma aproximação a partir da toolbox Simscape para inserir em um bloco a netlist usada em geral em ambiente SPICE onde poderia-se definir o modelo da chave necessária; como resultado o MATLAB não foi capaz de utilizar a definição do modelo de chave gerando um erro de compilação e quando foi possível simular o curva apresentada não se comportava como um RTD, mas como uma resistência pura. Apesar dessas dificuldades de simulação e dos problemas relatados por outros autores, o modelo foi simulado com sucesso no ambiente LTspice. Como resultados temos a pior das aproximações, porém suficiente para o sucesso da simulação e para a análise dos resultados; com mais elementos reproduzindo outros fenômenos talvez fosse possível chegar a um modelo mais próximo. Entretanto, foi visto que para seu modelo de validação os resultados foram melhores, o que indica ainda outro detalhe sobre os RTDs: em geral estes modelos são criados para uma gama de dispositivos que apresentam características IV parecidas, semelhanças que vão desde o tamanho do vale à inclinação da NDR, e isto influi diretamente na perfeição com que um modelo será capaz de adequar seus parâmetros a uma outra curva que não aquela de validação. Modificando os parâmetros da chave controlada chegou-se a uma melhor aproximação, em especial da região NDR que encontrava-se muito deslocada no primeiro modelo.

Entre os tempos de processamento ficou claro que o modelo de Redes Neurais foi 5 vezes mais lento que o modelo Físico-Matemático. Sabe-se que isso se dá ao próprio formado do modelo onde o processamento é feito em uma rede de neurônios e não mais por uma equação matemática comum. Entretanto, como explicado anteriormente, não foi possível simular o modelo de circuitos no MATLAB o que nos impede de fazer uma comparação mais precisa e ter um juízo definitivo sobre os modelos. Para tentar contornar esse problema compara-se o grau de complexidade do circuito proposto no modelo de grandes sinais com aquele de pequenos sinais. Como os circuitos estão na mesma ordem de grandeza de quantidade de elementos e estes são relativamente simples não possuindo transistores nem outros elementos mais complexos, pode-se intuir que uma simulação bem-sucedida do modelo de grandes sinais geraria um tempo médio de processamento na mesma ordem de grandeza daquele de pequenos sinais. Assim, por se tratar de uma aproximação pode-se concluir que os modelos Físico-Matemático e de Circuitos são aproximadamente equivalentes em tempo de processamento e são 5 vezes mais rápidos que o modelo de Redes Neurais. Este fato é muito importante quando se pensa em aplicações em grande escala em que o tempo de processamento individual é multiplicado; e, assim, uma diferença de 0,9s passa a ser crucial na escolha de modelo a ser utilizado.

5.2 Modelo de pequenos sinais

Por não ser possível modelar os fenômenos em frequência dos modelos de grandes sinais baseados em redes neurais e nas características físicas, o modelo de circuitos de pequenos sinais será analisado com outros trabalhos encontrados na literatura como os de Le et al. [22], Wang et al. [21] e Bhattacharya et al. [16].

O maior problema para o RTD nesse tipo de modelagem é a necessidade de cálculo dos diversos

parâmetros para cada polarização. Isso gera uma série de complicações matemáticas e em especial na simulação de circuitos. Por isso, algumas vezes os RTDs foram modelados como um sistema linear por partes dividindo as 3 regiões principais em 3 retas para facilitar este trabalho de cálculo. A polarização, então, é um dos pontos essenciais e, além disso, é necessário ter um bom estudo do comportamento esperado de cada elemento para facilitar o cálculo e a simulação dos circuitos. Como colocado na Tab. 4.3 temos 4 pontos de polarização em que podemos trabalhar. Além disso, o problema com um valor negativo de resistência (para valores dentro da NDR) foi contornado modificando-se o ajuste da rotina MATLAB que modela o resistor retirando o erro gerado ao inserir-se valores negativos de resistência.

Com o resultado das simulações, não foram encontrados os problemas representados no trabalho de Le et al. pelas Figs. 5.1(a)-(b) onde o tempo do passo impediu uma correta saída do sistema. Mas, diferentemente da literatura [22, 21], vemos um erro nas bordas do circuito inversor simulado que não corresponde ao overshooting habitual encontrado. Neste trabalho foi concluído que tal erro se deve, em especial, ao algoritmo de solução utilizado pelo MATLAB e não um comportamento usual do circuito inversor implementado. Por fim, em todos os trabalhos, vê-se uma perda do '0' lógico graças a inserção do transistor de entrada.

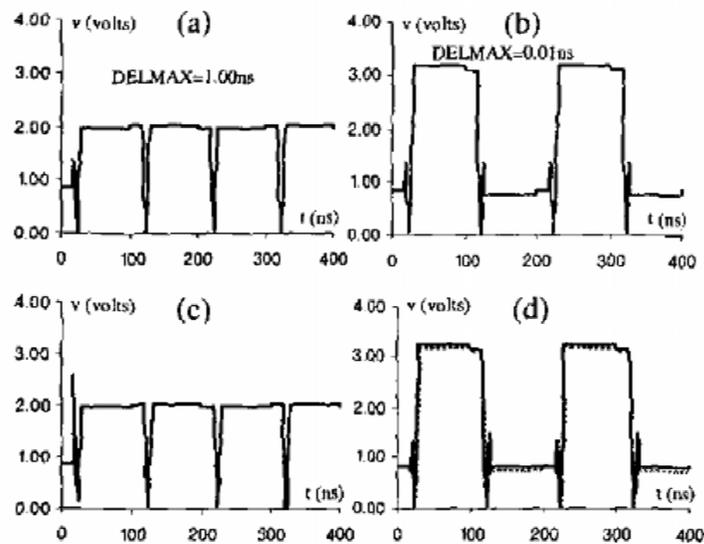


Figura 5.1: 4 saídas encontradas por Le et al para (a) HSPICE com grande passo (b) HSPICE com pequeno passo (c) SPICE3 e (d) ACESn

O tempo de processamento foi consideravelmente menor para o modelo aqui utilizado simulado em MATLAB. Apesar de não ser informado o tipo de processador utilizado sabe-se que o artigo é relativamente novo (2003), o que indica que os processadores estão relativamente no mesmo patamar já que o processador aqui utilizado seria relativamente compatível com aqueles de então. Vê-se então que o que o circuito perde em problemas de método de processamento interno do MATLAB, ganha em velocidade, o que seria uma grande vantagem para a simulação de grandes circuitos.

Entretanto, apesar de seus criadores indicarem medidas em uma banda de 45MHz a 12GHz, aumentando a frequência do circuito temos uma perda na resposta chegando a descaracterizar a

inversora como pode ser visto na Fig. 5.2. O artigo não apresenta informações sobre simulações com circuitos, o que seria uma novidade tratada nesse projeto, mas apenas de medidas tiradas nesta banda de frequência. Os autores consideram as medidas para o RTD real corretas para toda a banda e apresentam que a frequência de corte seria de 3GHz para o circuito equivalente. Assim, tem-se que o circuito inversor funcionou corretamente para uma frequência de 50MHz, mas para valores muito maiores que este o sistema apresentou problemas em relação a constante de tempo do circuito. Por se tratar de uma análise muito mais profunda que envolve medidas em frequência e que foge ao escopo deste trabalho é sugerida que uma nova análise deve ser feita para retirar conclusões definitivas.

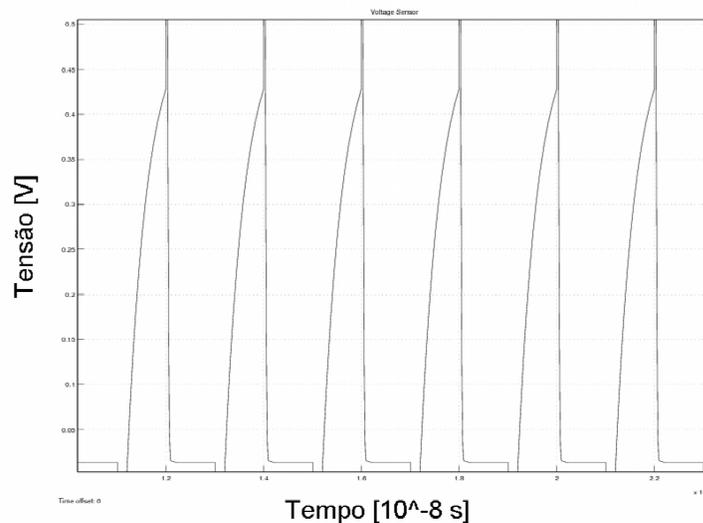


Figura 5.2: Problema no circuito inversor ao aumentar a frequência da onda de entrada para 500MHz

5.3 Programas de simulação

Apesar de não ser objetivo desse trabalho discutir profundamente sobre problemas de simulação, é necessário ressaltar os esforços despendidos nessa área. Muitos autores tem analisado e tentado implementar novas rotinas, métodos numéricos, métodos de simulação chegando inclusive a criar-se novos simuladores [10, 21, 20, 23, 16]. Neste trabalho, exceto os problemas nas bordas do circuito inversor identificados como sendo um problema do método interno do MATLAB de resolução do sistema, nenhum outro problema como de erro de convergência foi encontrado.

Em relação aos programas, a maior dificuldade não estava na análise dos resultados, mas na própria confecção dos modelos dentro de seus ambientes. Muitas vezes elementos não eram compatíveis ou definições não eram aceitas por um ou outro programa e em especial o problema de compatibilidade entre as toolboxes do MATLAB. Esperava-se encontrar dentro da versão R2009a uma certa convergência na maneira de trabalhar para que redes neurais, circuitos e blocos gerais do simulink pudessem trabalhar em conjunto. Ao contrário, foram encontrados erros de compilação por uma toolbox não aceitar um comando ou não compreender uma instrução que foi utilizada

em outro ambiente. O trabalho com a nova toolbox SimElectronics foi satisfatório mas ainda falta praticidade na construção dos circuitos e uma maior gama de dispositivos para simulação.

5.4 Problemas de bibliografia

Durante todo o processo de modelagem, verificação e simulações os artigos científicos foram grandes guias. Em especial por se tratar de uma nova área com novas problemáticas e ainda carente de ferramentas de trabalho que levem em conta suas novas características, os artigos foram base para toda a discussão aqui tratada. Entretanto, desde o princípio houve uma certa dificuldade em encontrar respostas claras e, em especial, de encontrar artigos que apresentassem dados suficientes para a reprodução de seus modelos. Pela falta de dispositivos no próprio laboratório para que medidas fossem feitas, era necessário que os artigos apresentassem metodologias mais claras e resultados mais consistentes. Notou-se que, em geral, artigos mais recentes apresentam mais problemas nesse sentido, o que reflete diretamente nos modelos escolhidos: modelo de grandes sinais baseado nas características físico-matemáticas publicado em 1996 (apesar de que a discussão talvez não caiba a esse artigo, visto que dos três modelos esse aparenta ser o mais consolidado na área científica), modelos baseados em elementos de circuito publicados em 1991 para pequenos sinais e 1996 para grandes sinais. Assim, muitos esforços foram despendidos na validação de um grande número de modelos, porém durante o processo descobria-se a falta de um parâmetro que impedia a conclusão do processo.

Capítulo 6

Conclusões

Neste projeto, três modelos de grandes sinais e um modelo de pequeno sinais foram implementados com sucesso. Destes modelos, três pertencem a bibliografia pesquisada enquanto um deles foi calculado e montado pela autora. Todos os modelos passaram por testes de verificação e validação e apresentaram características satisfatórias para a aplicação em circuitos.

Dos modelos pôde-se concluir que o modelo de circuitos se mostrou mais rápido que os outros modelos propostos enquanto que o modelo de redes neurais, apesar de mais lento, mostrou a maior precisão em relação a aproximação da curva aos dados experimentais. Todos eles possuem vantagens e desvantagens e ficou claro que nenhum deles pode ser bem trabalho sem um programa de simulação consistente devido a dificuldade do trabalho com transportes quânticos e a característica diferencial negativa dos diodos.

Em relação aos circuitos simulados, todos apresentaram boa resposta aos valores de entrada. Nos modelos de grandes sinais pôde ser comprovado o funcionamento monoestável-biestável da junção de dois RTDs, enquanto que o modelo de pequenos sinais apresentou uma aplicação prática para portas lógicas inversoras. Apesar dos problemas de simulação encontrados durante o processo não foram encontrados problemas de convergência, como relatado pela bibliografia, para modelos de pequenos sinais com a utilização do MATLAB.

Com a conclusão deste trabalho novos direcionamentos podem ser tomados. Os modelos de grandes sinais ainda carecem de uma interface amigável para projetar circuitos sem a necessidade de scripts do MATLAB e o modelo de pequenos sinais precisa ser melhor estudado, em especial sua resposta em frequência. Uma proposta também interessante é o trabalho com a curva física para determinar melhor analogia entre parâmetros físicos reais e a proposta para a curva IV, introduzindo mais parâmetros ao modelo físico mas ao mesmo tempo aproximando mais sua curva aos dados experimentais. Com um bom modelo físico é mais fácil prever a construção de um RTD com características desejadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BANDEIRA, M. C. et al. Modeling negative differential resistance (ndr) devices using radial basis function neural networks. *ECS Transactions - SBMICRO2007*, v. 13, p. 463–472, 2007.
- [2] ZIONG, C. et al. Fabrication of p-well resonant tunneling diode based on sige/si and its dc-parameter extraction. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 7, p. 379–382, 2004.
- [3] GOSER, K.; PACHA, C. System and circuit aspects of nanoelectronics. *Solid-State Circuits Conference, 1998. ESSCIRC '98. Proceedings of the 24th European*, p. 18–29, 1998.
- [4] SUN, J. P. et al. Resonant tunneling diodes: models and properties. *Proceedings of the IEEE*, v. 86, p. 641–660, 1998.
- [5] SCHULMAN, J. N.; SANTOS, H. J. D. L.; CHOW, D. H. Physics-based rtd current-voltage equation. *IEEE Electron Device Lett.*, v. 17, p. 220–222, 1996.
- [6] NECULOIU, D.; TEBEANU, T. Spice implementation of double barrier resonant tunnel diode model. *Semiconductor Conference*, p. 181–184, 1996.
- [7] MILES, R. E.; MILLINGTON, G.; POLLARD, R. D. Accurate equivalent circuit model of resonant tunnelling diodes. *Electronics Letters*, v. 27, p. 427–428, 1991.
- [8] GERING, J. M. et al. A small-signal equivalent-circuit model for gaas-algaas resonant tunneling heterostructures at microwave frequencies. *Journal of Applied Physics*, v. 61, p. 271–276, 1987.
- [9] MA, L. et al. A small-signal equivalent-circuit model for gaas-algaas resonant tunneling heterostructures at microwave frequencies. *Chinese Physic Letters*, v. 23, p. 2292–2295, 2006.
- [10] DO, V. N.; DOLLFUS, P.; NGUYEN, V. L. Transport and noise in resonant tunneling diode using self-consistent green's function calculation. *Journal of Applied Physics*, n. 100, 2006.
- [11] TEGART, G. Nanotechnology: The technology for the 21st century. *The APEC Center for Technology Foresight*, 2001.
- [12] DURÃES, J. A. et al. Observation of negative differential resistance and hysteretic effect on buriti oil: polystyrene organic devices. *Applied Physics Letters*, n. 89, p. 13352–1, 2006.
- [13] PETTENGHI, H.; AVEDILLO, M. J.; QUINTANA, J. M. Novel improved rtd based implementation of multi-threshold logic gates. *Research in Microelectronics and Electronics*, v. 1, p. 82–85, 2005.

- [14] GOSER, . K.; GLÖSEKÖTTER, P.; DIENSTUHI, J. [S.l.: s.n.], 2004.
- [15] HAYKIN, S. Neural networks - a comprehensive foundation. 1994.
- [16] BHATTACHARYA, M.; MAZUMDER, P. Augmentation of spice for simulation of circuits containing resonant tunneling diodes. *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions*, v. 20, p. 39–50, 2001.
- [17] [HTTP://WWW.MATHWORKS.COM](http://www.mathworks.com).
- [18] [HTTP://PT.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SIMULINK](http://pt.wikipedia.org/wiki/Simulink).
- [19] [HTTP://PT.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SPICE](http://pt.wikipedia.org/wiki/Spice).
- [20] HUANG, C. Y.; MORRIS, J. E.; SU, Y. K. Generalized formula for the stability and instability criteria of current-voltage characteristics measurements in the negative differential conductance region of a resonant tunneling diode. *Journal of Applied Physics*, v. 82, p. 2690–2696, 1997.
- [21] WANG, J. M. et al. Simulation and design of nanocircuits with resonant tunneling devices. *IEEE transactions*, v. 54, p. 1293–1304, 2007.
- [22] LE, J.; PILEGGI, L.; DEVGAN, A. Circuit simulation of nanotechnology devices with non-monotonic i-v characteristics. *Proceedings of the 2003 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design*, p. 491–496, 2003.
- [23] BHATTACHARYA, M.; MAZUMDER, P. Convergence issues in resonant tunneling diode circuit simulation. *Thirteenth International Conference on VLSI Design*, p. 499–504, 2000.

ANEXOS

I. ROTINAS MATLAB E NETLIST SPICE

I.1 Rotina MATLAB para Modelo baseado em Redes Neurais

```
%  
%MODELO DE GRANDES SINAIS BASEADO EM REDES NEURAIAS DE BASE RADIAL  
%  
%Dados extraídos de: Physic-Based RTD Current-Voltage Equation [5]  
%RTD feito de InGaAs/AlAs com 26 angstroms de barreira e 48 angstroms de poço quântico.  
%  
  
%Valores retirados da curva  
Vout=[0 0.125 0.25 0.375 0.5 0.675 0.75 0.875 1 1.125 1.18 1.21 1.25  
1.375 1.5 1.75 1.875 2 2.125 2.25 2.375 2.5];  
V=1:1:22; %quantidade de pontos  
I=[0 0 0.05 0.15 0.3 0.75 1.2 1.5 2.2 3.1 3.4 2.65 2 0.8 0.5 0.2 0.25 0.3 0.45 0.75 1.2 1.75];  
I=I.*104;  
  
%O treinamento da rede é feita por uma função dada pelos valores de  
%corrente versus o número de pontos medidos.  
plot(V,I,'+');  
title('Vetores de treinamento');  
xlabel('Tensão V');  
ylabel('Corrente I');  
  
%Função de ativação da rede  
p = -3:1:3;  
a = radbas(p);  
plot(p,a)  
title('Função de Transferência de Base Radial');  
xlabel('Entrada p');  
ylabel('Saída a');  
  
%Todas as funções aplicadas  
a2 = radbas(p-1.5);  
a3 = radbas(p+2);  
a4 = a + a2*1 + a3*0.5;  
plot(p,a,'b-',p,a2,'b-',p,a3,'b-',p,a4,'m-')  
title('Soma ponderada das funções de transferência de base radial');  
xlabel('Entrada p');  
ylabel('Saída a');
```

```

%Treinamento da rede
%Os parâmetros são escolhidos de acordo com o formato da curva a ser aproximada.
%Em geral os valores aqui assumidos não precisam de modificações.
tic
eg = 0.01; % Quadrado da soma do erro aceitável
sc = 0.4; % Constante de espalhamento
net = newgrnn(V,I,sc); %criação da rede
toc

%Dados experimentais
plot(Vout,I,'+');
xlabel('Tensão [V]');
ylabel('Corrente [mA]');

%Criação da curva IV
tic
X = 1:1:22;
Y = sim(net,X);
hold on;
plot(Vout,Y);
xlabel('Tensão [V]');
ylabel('Corrente [mA]');
hold off;
legend('Target','Output')
save rede.mat net
gensim(net,-1) %criação do bloco para a toolbox

```

I.2 Rotina MATLAB para Modelo físico-matemático

%Utilização de uma expressão matemática baseada em um modelo físico para
%modelar um RTD

```

clear all %—— Parâmetros constantes ——

q = 1.602 * 10(-19);
T = 300;
k = 1.381 * 10(-23);
%hc = (6.53 * 10(-34))/(2 * pi); %m = 0.04 * 9.11 * 10(-31);

% — Relações entre parâmetros físicos e aqueles utilizados no modelo —

```

```

%Ef = B * q
%Er = C * q
%Tau = D * 2 * q
%HporMesp = (q * k * T * Tau)/(A * 4 * pi^2)

% A = (q * m * k * T * Tau)/(4 * pi^2 * hc^3);
% B = Ef; %jdivididopelacargadoeltron
% C = Er;
% D = Tau/(2 * q);
% — Utilizando valores de Physics based RTD Current Voltage Equation,
% J. N. Schulman RTD made of In0.53Ga0.47As/AlAs
A = 10^4;
B = 0.035;
C = 0.1472;
D = 0.0052;
n1 = 0.115;
H = 1.411 * 10^(-1);
n2 = 0.1201;
clear V;
V=0;

tic
forG = 1 : 261
J1 = A * log((1 + exp(((B - C + n1 * (V)) * q)/(k * T)))/(1 + exp(((B - C - n1 * (V)) * q)/(k * T)))) * (pi/2 + atan((C - n1 * (V))/D));
J2 = H * (exp((n2 * q * V)/(k * T)) - 1);
J = (J1 + J2);
V = V + 0.01;
d1(1, G) = J;
d2(1, G) = J1;
d3(1, G) = J2;
end
V = 0 : 0.01 : 2.6;
plot(V, d1, 'm-');
toc

```

hold on

%Dados ignorando o 'plateaulike'

```

%A = [0; 0.125; 0.25; 0.375; 0.5; 0.675; 0.75; 0.875; 1; 1.125; 1.18; 1.21;
1.25; 1.375; 1.5; 1.75; 1.875; 2; 2.125; 2.25; 2.375; 2.5]

```

```

%B = [0; 0; 0.05; 0.15; 0.3; 0.75; 1.2; 1.5; 2.2; 3.1; 3.4; 2.65; 2; 0.8; 0.5;
0.22; 0.25; 0.3; 0.45; 0.75; 1.2; 1.75]
%B = B. * 104
%plot(A, B, 'r.')

```

```

%Dados com o problema 'plateaulike'
A = [0; 0.125; 0.25; 0.375; 0.5; 0.675; 0.75; 0.875; 1; 1.125; 1.18; 1.21; 1.25;
1.4; 1.5; 1.625; 1.67; 1.7; 1.75; 1.875; 2; 2.125; 2.25; 2.375; 2.5]
B = [0; 0; 0.05; 0.15; 0.3; 0.75; 1.2; 1.5; 2.2; 3.1; 3.4; 2.65; 2; 1.55; 1.55; 1.55;
1.1; 0.22; 0.22; 0.25; 0.3; 0.45; 0.75; 1.2; 1.75]
B = B. * 104
plot(A, B, 'r+')
xlabel('Tensão [V]');
ylabel('Corrente [A/cm2]');
%xlabel('Voltage [V]');
%ylabel('Current [A/cm2]');
hold off

```

```

figure()
%gráfico da influência separada das duas correntes: J1 - corrente de
%tunelamento e J2 - corrente termoiônica.
V=0:0.01:2.6;
plot(V,d2,'r-')
hold on
plot(V,d3,'b-')
xlabel('Tensão [V]');
ylabel('Densidade de corrente [A/cm2]');
%xlabel('Voltage [V]');
%ylabel('Current [A/cm2]');
hold off

```

% — Utilizando valores de Physics based RTD Current Voltage Equation,
% J. N. Schulman RIT (Resonant interband tunneling diode) made of
% InAs/AlSb/GaSb

```

A = 104;
B = 0.0456;
C = 0.0689;
D = 0.0051;
n1 = 0.430;
H = 1.43;
n2 = 0.4373;

```

```

figure()
V = 0;

for G = 1:600
J1 = A * log((1 + exp(((B - C + n1 * (V)) * q)/(k * T)))/(1 + exp(((B - C - n1 * (V)) * q)/(k *
T)))) * (pi/2 + atan((C - n1 * (V))/D));
J2 = H * (exp((n2 * q * V)/(k * T)) - 1);
J=(J1+J2);
e1(1,G)=J;
e2(1,G)=J1;
e3(1,G)=J2;
V = V+0.001;
end
V=0:0.001:0.599;
plot(V,e1,'m-');
xlabel('Tensão [V]');
ylabel('Densidade de corrente [A/cm²]');
%xlabel('Voltage [V]');
%ylabel('Current [A/cm²]');
hold off

```

```

figure()
%gráfico da influência separada das duas correntes: J1 - corrente de
%tunelamento e J2 - corrente termoiônica.
V=0:0.001:0.599;
plot(V,e2,'r-')
hold on
plot(V,e3,'b-')
xlabel('Tensão [V]');
ylabel('Corrente [A/cm²]');
%xlabel('Voltage [V]');
%ylabel('Current [A/cm²]');
hold off

```

I.3 NETLIST criada por Neculoiu et al. para simulação do seu modelo

```

* Circuito RTD
.subckt rtdmod 1 2
ds1 1 3 DTUN1
s2 3 2 3 2 s1

```

```
dp1 1 4 DTH
rdp1 4 2 RSER 5
.ends rtdmod
.model DTUN1 d(is=1e-6 n=2)
.model DTH d(is=1e-18)
.model s1 sw (ron=20 roff=133 vt=0.2 vh=0.4)
.model RSER res
```

I. BIBLIOTECA DE RTDS CRIADA PELO MODELO DE REDES NEURAIIS

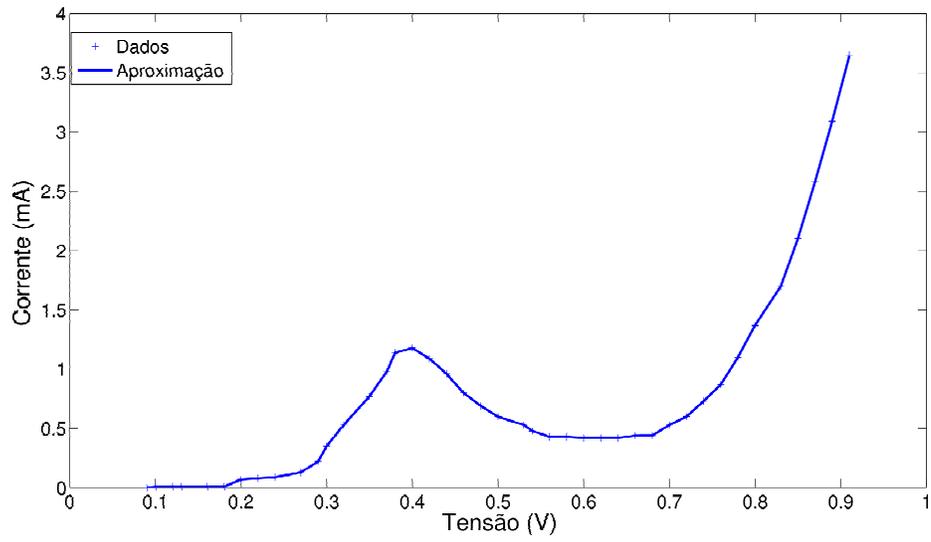


Figura I.1: RTD modelado a partir dos dados experimentais de [8]

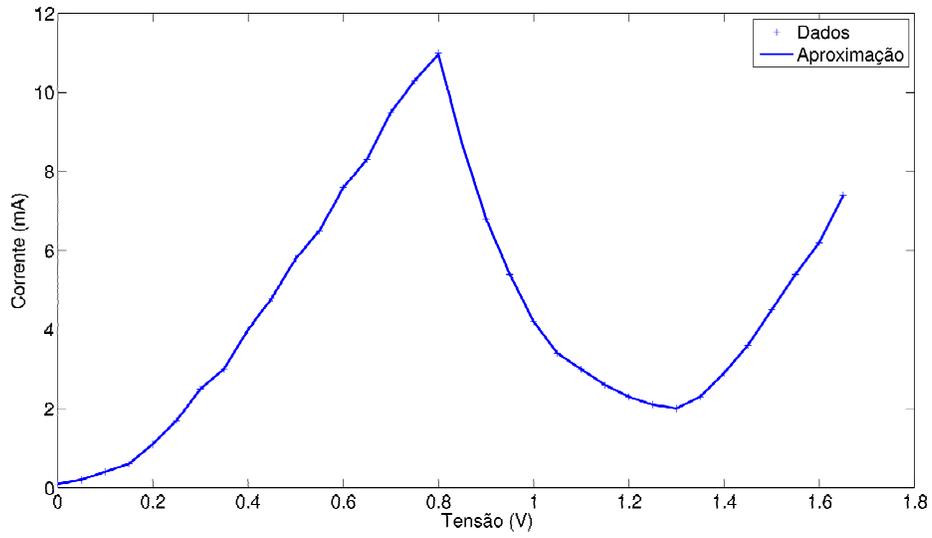


Figura I.2: RTD modelado a partir dos dados experimentais de [9]

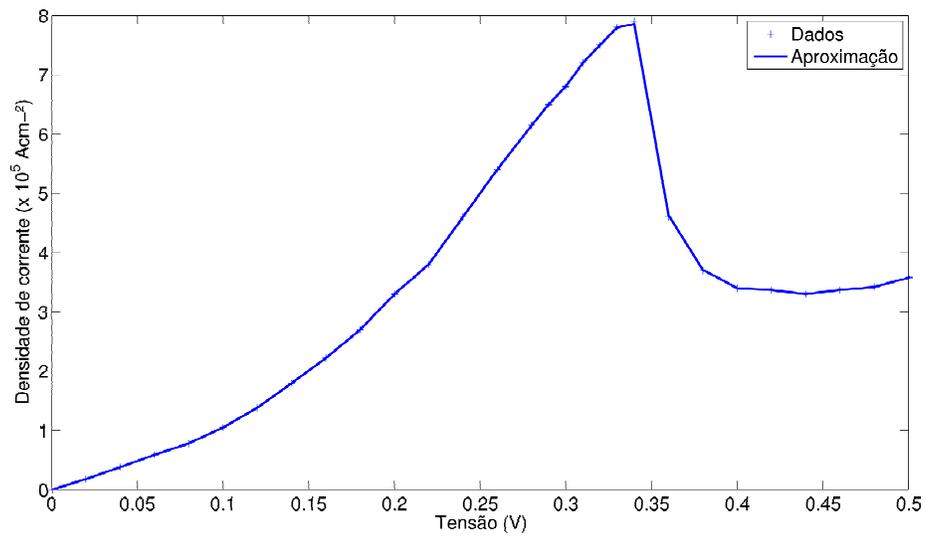


Figura I.3: RTD modelado a partir dos dados experimentais de [10]

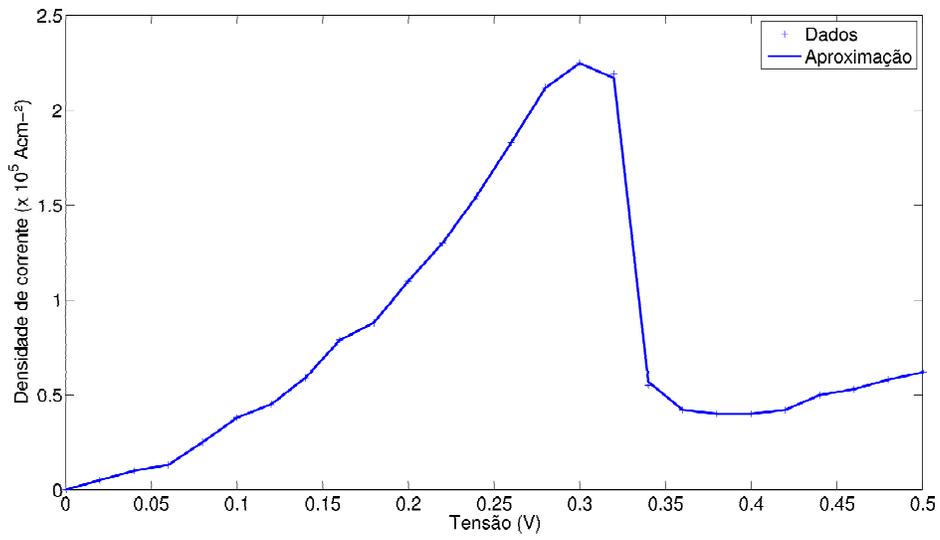


Figura I.4: RTD modelado a partir dos dados experimentais de [10]