

UNIVERSIDADE FEEVALE

EDUARDO COSTA BRAGA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA PARA
ANÁLISE TÉRMICA DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS**

Novo Hamburgo, junho de 2015.

Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas - ICET
Engenharia Eletrônica
Trabalho de Conclusão de Curso I

Professor Orientador: Delfim Luiz Torok

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz da Silva Braga e Ieda Maria da Costa Braga, assim como à toda minha família pelo apoio, paciência e confiança concedidos para a concretização de mais essa etapa em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais Luiz e Ieda, pelo amor, incentivo e apoio incondicional para com minha educação e formação pessoal. À minha irmã Kassiani, pelos momentos de convivência e aprendizado.

Agradeço, em especial, ao Professor Orientador Delfim Luiz Torok que sempre me auxiliou com minhas dúvidas e dificuldades, e pela confiança e apoio na realização deste trabalho.

Aos professores, colegas e amigos da Universidade Feevale, pelas histórias, divisão de experiências e compartilhamento de saberes.

RESUMO

O crescente aumento da capacidade de processamento dos circuitos eletrônicos tem causado uma maior produção de calor dissipado sobre os mesmos, tornando-se necessário o planejamento do equilíbrio térmico para que este opere de forma confiável, dentro das condições ambientais especificadas, durante sua vida útil. Este Trabalho apresenta o estudo e projeto para o desenvolvimento de um protótipo de sistema termográfico para análise térmica de circuitos eletrônicos, onde, através da utilização de sensores térmicos infravermelho é gerado um mapa de temperaturas o qual é sobreposto à imagem digital do circuito eletrônico, proveniente de uma câmera CMOS VGA, utilizando-se de métodos de processamento digital de imagens embarcados em arquitetura de hardware reconfigurável do tipo FPGA, a fim de se obter a imagem termográfica em um monitor de vídeo padrão VGA e os respectivos valores de temperatura para análise em software. Os resultados obtidos experimentalmente serão comparados aos obtidos através de simulação numérica em software de elementos finitos.

Palavras-chave: Termografia. FPGA. Análise Térmica. Simulação Numérica. Circuitos Eletrônicos.

ABSTRACT

The increasing electronic circuit processing capacity has caused a greater production of heat dissipated on them, making it necessary planning of thermal equilibrium for it to operate reliably within the specified environmental conditions during its lifetime. This work presents the study and design for development of a thermographic system prototype for thermal analysis of electronic circuits, which, through the use of infrared thermal sensors is generated a temperature map which is superimposed on the digital image of the electronic circuit made by a camera VGA CMOS, using digital image processing methods embedded in hardware reconfigurable FPGA architecture, in order to obtain a thermographic image in a standard VGA video monitor and its temperature values for analysis in software. The experimental results are compared to those obtained by numerical simulation finite element software.

Keywords: Thermography. FPGA. Thermal analysis. Numerical Simulation. Electronic Circuits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Espectro Eletromagnético.....	15
Figura 1.2 – Diagrama da radiação térmica do espectro eletromagnético.....	16
Figura 1.3 – Bandas espectrais do infravermelho.....	16
Figura 1.4 – Bloco diagrama simplificado de um sistema termográfico.....	20
Figura 1.5 – Esquema de construção de uma termopilha.....	23
Figura 1.6 – Espaço bidimensional de coordenadas cartesianas de uma imagem digital.....	25
Figura 1.7 – Amostragem e quantização de uma imagem contínua.....	27
Figura 1.8 – Variação da resolução espacial de uma imagem digital.....	27
Figura 1.9 – Variação da resolução de bit de uma imagem digital.....	28
Figura 1.10 – Pirâmide das etapas do processamento digital de imagens.....	29
Figura 1.11 – Vizinhança de pixels.....	30
Figura 1.12 – Filtragem linear utilizando uma máscara de convolução.....	32
Figura 1.13 – Operadores diferenciais.....	33
Figura 1.14 – Distribuição espacial de pixels em vizinhança-8.....	33
Figura 1.15 – Máscaras de filtros detectores de borda.....	35
Figura 1.16 – Magnitude da resposta dos filtros de bordas de <i>Roberts</i> , <i>Prewitt</i> e <i>Sobel</i>	35
Figura 1.17 – Formação da imagem de vídeo na tela de um monitor e respectivo sinal horizontal de vídeo.....	37
Figura 1.18 – Método de varredura entrelaçado.....	38
Figura 1.19 – Diagrama conceitual de um monitor CRT.....	39
Figura 1.20 – Esquema de construção de um monitor LCD.....	41
Figura 1.21 – Diagrama de temporização do sincronismo horizontal e vertical.....	43

Figura 1.22 – Arquitetura geral de um FPGA genérico.....	45
Figura 1.23 – Fluxo de projeto básico para modelagem em VHDL.....	48
Figura 1.24 – Estrutura de um código em VHDL.....	49
Figura 1.25 – Principais causas de falhas em circuitos eletrônicos.....	50
Figura 1.26 – Deformações mecânicas em função da temperatura.....	51
Figura 1.27 – Partes que constituem um sistema eletrônico.....	53
Figura 2.1 – Leiaute do gabarito térmico.....	55
Figura 2.3 – Foto do gabarito térmico montado e termômetro utilizado.....	56
Figura 2.4 – Distribuição de temperaturas no gabarito térmico.....	57
Figura 3.1 – Diagrama em blocos básico do protótipo proposto.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões de resolução de vídeo.....	42
Tabela 2 – Temperaturas medidas nos resistores do gabarito térmico.....	57
Tabela 3 – Especificações técnicas FPGA SPARTAN-3E.....	59
Tabela 4 – Especificações técnicas câmera CMOS VGA.....	60
Tabela 5 – Especificações técnicas sensor infravermelho.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)
VHSIC Hardware Description Language (VHDL)
Field Programmable Gate Array (FPGA)
Video Graphics Array (VGA)
Flame Retardant - 4 (FR-4)
Cathode Ray Tube (CRT)
Liquid Crystal Display (LCD)
Organic Light Emitting Diode (OLED)
Thin Film Transistor (TFT)
Application Specific Integrated Circuits (ASIC)
Programmable Logic Device (PLD)
Simple Programmable Logic Device (SPLD)
Complex Programmable logic device (CPLD)
Look Up Table (LUT)
Static Random Access Memory (SRAM)
Digital Signal Processor (DSP)
Phase Locked Loop (PLL)
Hardware Description Language (HDL)
Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)
Mean Time Between Failures (MTBF)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1 EMBASAMENTO TEÓRICO.....	14
1.1 Radiação térmica.....	15
1.2 Fundamentos da termografia.....	17
1.3 sensores térmicos infravermelho.....	20
1.4 Imagem de vídeo.....	24
1.5 hardware reconfigurável.....	32
1.6 linguagem de descrição de hardware.....	35
1.7 análise térmica em circuitos eletrônicos.....	38
1.8 Protocolo i ² c.....	42
1.9 Método dos elementos finitos.....	43
1.10 plataforma de prototipação e hardware.....	43
2 DESENVOLVIMENTO DO GABARITO TÉRMICO.....	43
3 PROJETO DO SISTEMA PROPOSTO.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
APÊNDICES.....	55
APÊNDICE A - FILTROS DE BORDAS.....	56

INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de um circuito eletrônico muitas são as variáveis a serem levadas em conta para que o mesmo apresente um funcionamento e vida útil de acordo com as especificações de projeto. Independentemente do circuito eletrônico que esteja sendo desenvolvido a temperatura é uma variável crítica de projeto, que em muitos casos não é corretamente considerada ocasionando retrabalho e redimensionamentos no circuito.

As transferências térmicas que ocorrem em circuitos eletrônicos são um exemplo de problemas de difícil abordagem através de métodos convencionais de medição de temperatura. Esta dificuldade se deve à presença de materiais compósitos com diferentes condutividades térmicas, várias fontes de calor com diferentes intensidades e fluxos de fluido com diversos regimes de escoamento, típicos de uma placa de circuito impresso (AZAR, 1997).

De modo que este conjunto de problemas é único para as diferentes topologias de circuitos eletrônicos e de difícil abordagem através de métodos analíticos ou computacionais, o método experimental se torna necessário, e em muitos casos é a única abordagem que resulta em uma solução viável de ser implementada. Para a análise experimental do comportamento térmico de um circuito eletrônico é necessário o conhecimento da distribuição da temperatura em toda a sua superfície, e não somente em determinados pontos do circuito como acontece nas análises através da utilização de termopares ou termômetros infravermelhos pontuais.

O objetivo geral deste Trabalho é o estudo e projeto para implementação de um protótipo de sistema termográfico em arquitetura de hardware reconfigurável do tipo *Field Programmable Gate Array* (FPGA), utilizando-se de uma câmera do tipo *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) utilizando o padrão *Video Graphics Array* (VGA) e um sensor térmico infravermelho composto por uma matriz de termopilhas, afim de se obter a imagem térmica do circuito eletrônico sob teste

em um monitor de vídeo padrão VGA, para posterior análise em software. Os dados obtidos experimentalmente com o protótipo do sistema termográfico são confrontados com os obtidos a partir de simulação em software de elementos finitos e com uma câmera termográfica comercial.

Para uma melhor compreensão da metodologia de projeto do protótipo, e abordagem dos objetivos específicos, é realizado um estudo da transferência de calor por radiação, termografia, sensores térmicos infravermelho, arquitetura de hardware reconfigurável do tipo FPGA, VHSIC *Hardware Description Language* (VHDL), processamento digital de imagens utilizando algoritmos em Matlab e análise térmica de circuitos eletrônicos. É também construído um gabarito térmico, um circuito composto por resistores axiais de fio enrolado e encapsulamento de cerâmica, com diferentes resistências e potências, soldados em uma placa de circuito impresso de substrato *Flame Retardant* - 4 (FR-4), para a análise térmica e validação do protótipo do sistema termográfico.

O volume deste Trabalho está dividido em três capítulos. No Primeiro Capítulo é apresentado o embasamento teórico o qual se fundamenta este trabalho, abordando o estudo dos aspectos físicos da termografia, sensores térmicos infravermelho, processamento digital de imagens, caracterização do hardware utilizado e análise térmica de circuitos eletrônicos. O Segundo Capítulo apresenta a construção do gabarito térmico e uma análise experimental com um termômetro infravermelho comercial, assim como sua modelagem e simulação em software de elementos finitos. No Terceiro Capítulo é apresentado o projeto do protótipo do sistema termográfico para análise térmica de circuitos eletrônicos, suas especificações e o hardware utilizado.

1 EMBASAMENTO TEÓRICO

Na análise térmica a temperatura é a variável que denota maior importância. Dentre as diferentes formas de se mensurar a temperatura de um sistema eletrônico, termômetros infravermelhos e câmeras termográfica são atualmente as mais utilizadas devido a não haver a necessidade de contato físico entre o sensor térmico e o dispositivo ao qual se quer medir a temperatura, além das vantagens da obtenção de uma imagem termográfica que possibilita identificar a temperatura de todos os componentes e conexões que compõem o circuito.

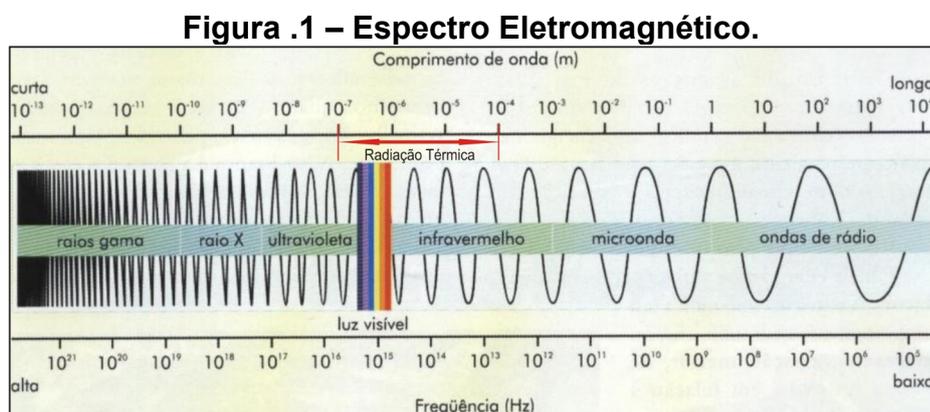
A implementação de um sistema termográfico requer processamento digital de imagem e vídeo, possibilitando que a radiação térmica captada pelo sensor infravermelho seja processada digitalmente e visualizada em um monitor de vídeo (FLIR, 2013). A organização das imagens digitais possibilita uma abordagem de processamento por meio de códigos de execução em paralelo, porém, é trivial a utilização de plataformas para o processamento de imagens baseados em computadores de arquitetura seqüencial, onde o processador executa apenas uma tarefa de cada vez, esta arquitetura limitará o desempenho do processamento ().

Desta forma, sistemas de processamento de imagens baseados em FPGA se apresentam como alternativa para superar limitações de tempo de execução dos algoritmos, pois, os mesmos são intrinsecamente paralelos e possibilitam flexibilidade para alteração, via software, das funcionalidades do hardware. Possibilitando, inclusive, processos onde é necessária operação em tempo real e que confiabilidade e determinismo são cruciais. Por se tratar de hardware dedicado, é possível realizar e obter os resultados em um mesmo ciclo de clock, de várias operações executadas de forma paralela ().

Assim, a utilização de processamento baseado em hardware reconfigurável se torna uma opção viável para o desenvolvimento de protótipos que envolvam processamento digital de imagens. Neste Capítulo são detalhadas as bases teóricas necessárias para o projeto do protótipo proposto.

1.1 RADIAÇÃO TÉRMICA

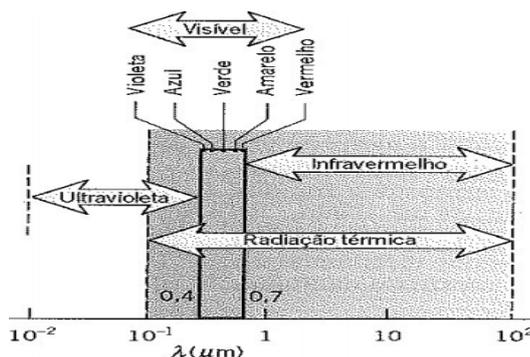
O processo pelo qual o calor é transferido de um corpo em função de sua temperatura, sem a intervenção de qualquer meio, é chamado radiação térmica. A radiação térmica é uma onda eletromagnética (KREITH, 2003). A classificação da radiação eletromagnética, distribuída em regiões, de acordo com o comprimento de onda e a frequência, é chamado de espectro eletromagnético, como ilustrado na Figura .1 (FLORENZANO, 2011).



Fonte – Adaptado de FLORENZANO, 2011.

O comprimento de onda da radiação eletromagnética depende de como ela é produzida. Todos os corpos, a uma temperatura acima do zero absoluto, emitem radiação térmica. Ou seja, a emissão de radiação térmica é regida pela temperatura do corpo emissor, com comprimentos de onda localizados aproximadamente entre 0,1 e 100 μm . Nesta faixa normalmente encontra-se o ultravioleta, a luz visível e o infravermelho, conforme apresenta a Figura .2 (KREITH, 2003).

Figura .2 – Diagrama da radiação térmica do espectro eletromagnético.



Fonte – Adaptado de INCROPERA et al., 2012.

Como a radiação eletromagnética de cada comprimento de onda interage de forma distinta e com diferentes intensidades com os objetos, um importante parâmetro para definir as características de um sensor são os comprimentos de onda a que o sensor irá responder. Na detecção de radiação térmica por equipamentos termográficos é comumente utilizado a banda do infravermelho, que possui comprimentos de onda entre 0,76 e 1000 μm , e é dividida em quatro bandas espectrais, como ilustra a Figura .3.

Figura .3 – Bandas espectrais do infravermelho.



Fonte – AUTOR, 2015.

O infravermelho próximo (0,76 - 1,2 μm) abrange a região típica daquela emitida por objetos muito quente (superiores a 400°C), é empregado em películas de fotografia infravermelha (MENESES, 2012).

A banda do infravermelho de ondas curtas (1,2 - 3 μm) se utiliza da luz refletida, muito semelhante ao que ocorre nas câmeras do espectro visível ao olho humano, possuindo aplicações em equipamentos de visão noturna. Também é a região onde os comprimentos de onda em 1,4 μm e 1,9 μm são totalmente absorvidos pelas moléculas de vapor d'água da atmosfera (MENESES, 2012).

O infravermelho médio (3 - 5 μm) é a banda espectral em que o Sol e a Terra não emitem quantidades suficientes de energia que possibilitem ser detectadas por sensores acima da atmosfera terrestre, porém, objetos com elevada temperatura são detectados, como vulcões em erupção e incêndios florestais. Possui aplicações em sensores meteorológicos (MENESES, 2012).

A banda do infravermelho termal (5 - 1000 μm) compreende a radiação emitida pelos objetos terrestres em função das suas temperaturas de superfícies. Como a atmosfera terrestre absorve parte da energia da radiação do espectro infravermelho, a melhor janela atmosférica nessa região espectral para utilização em sensores termográficos é o intervalo de 8,0 μm a 14 μm (MENESES, 2012).

Com base nas diferentes bandas do infravermelho é possível o correto dimensionamento do sensor, de acordo com sua resposta espectral disponibilizada pelo fabricante, para aplicações específicas que envolvam o infravermelho.

1.2 FUNDAMENTOS DA TERMOGRAFIA

Termografia é definida como a ciência que se utiliza de dispositivos ópticos eletrônicos para detectar e medir a radiação infravermelha, correlacionando com a temperatura da superfície do objeto emissor (SNELL, 2009). Os dispositivos ópticos eletrônicos não medem temperatura ou tão pouco possibilitam enxergar através da matéria, estes dispositivos respondem a uma determinada banda espectral da radiação infravermelha para a qual foram fabricados.

A premissa física básica que fundamenta a termografia é que todos os objetos acima do zero absoluto (-273 °C) emitem radiação infravermelha. Esta radiação é função de um certo número de diferentes características do objeto emissor, dos quais apenas um é a temperatura. O aumento da temperatura do objeto causa alterações na energia infravermelha emitida, como aumento da frequência, conseqüente diminuição do comprimento de onda e aumento da energia eletromagnética emitida (RUDDOCK, 2010).

A relação entre temperatura, comprimento de onda e quantidade de energia emitida, é descrita pela Lei de Planck. Esta Lei descreve a distribuição espectral de energia para qualquer temperatura específica ao longo de todos os comprimentos de onda (RUDDOCK, 2010). De modo a se ter um padrão de referência para definir a emissão e absorção de radiação, idealizou-se o conceito teórico de corpo negro de acordo com a Lei de Planck. O corpo negro, é definido como um corpo que emite e absorve, em qualquer temperatura, a máxima quantidade de radiação possível, em qualquer comprimento de onda fornecido (KREITH, 2003).

Como a maioria dos objetos emitem energia em muitos comprimentos de onda, por vezes é necessário que se saiba em qual comprimento de onda está a máxima energia emitida. Desta forma, este comprimento de onda é determinado aplicando-se a Lei de Wien, a qualquer temperatura em graus Kelvin (K). Esta Lei se torna útil para determinar a resposta espectral do dispositivo óptico eletrônico de acordo com a temperatura que se quer mensurar (RUDDOCK, 2010). A Equação (.1) descreve a Lei de Wien.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (.1)$$

Onde,

λ_{\max} é o comprimento de onda, em metros (m), onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima;

T é a temperatura absoluta do corpo em Kelvin (K), e

b é a constante de dispersão de Wien, em metro-Kelvin (m*K).

A quantidade de energia irradiada por um corpo negro é proporcional à sua temperatura em Kelvin elevado à quarta potência, conforme a Lei de Stefan-Boltzmann. Ou seja, uma pequena variação da temperatura provoca uma grande variação da energia irradiada, isto explica a grande sensibilidade, em relação a pequenas variações de temperatura, dos dispositivos ópticos eletrônicos utilizados

em termografia (RUDDOCK, 2010). A Equação (.2) descreve a Lei de Stefan-Boltzmann para um corpo negro.

$$E_b(T) = \sigma * T^4 \quad (.2)$$

Onde,

$E_b(T)$ é a emitância da radiação de corpo negro, em Watts por metro quadrado (W/m^2);

σ é a constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,670 \times 10^{-8} W/m^2K^4$, e

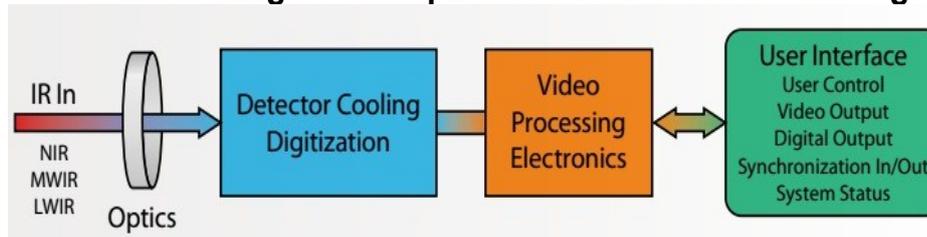
T é a temperatura absoluta do corpo, em Kelvin (K).

Os princípios físicos apresentados que fundamentam a termografia, são válidos para um radiador ideal, o corpo negro, porém, as superfícies dos objetos reais não se comportam como corpos negros, desta forma para caracterizar as propriedades de radiação de superfícies não-negras, um parâmetro adimensional chamado de emissividade é necessário.

A emissividade é definida como a taxa a que um objeto emite energia comparada com a de um corpo negro a uma dada temperatura e comprimento de onda. Características de uma superfície como, temperatura, comprimento de onda da radiação emitida, material constituinte e geometria definem a sua emissividade. Em um sistema termográfico a emissividade deve ser calibrada, de acordo com a superfície que se quer mensurar a temperatura (RUDDOCK, 2010).

Sistemas termográficos, são similares a uma câmera de vídeo digital. Seus principais componentes são: dispositivo óptico eletrônico, que capta a intensidade de radiação infravermelha e converte em um sinal elétrico, hardware dedicado ao processamento de vídeo e interface com o usuário, que em muitas aplicações trata-se de um monitor de vídeo para a exibição da imagem termográfica, conforme apresentado na Figura .4.

Figura .4 – Bloco diagrama simplificado de um sistema termográfico.



Fonte – FLIR, 2013.

Nas câmeras termográficas para se calcular a temperatura com base na intensidade de radiação captada pelo dispositivo óptico eletrônico, é utilizado a Lei de Stefan-Boltzmann. Porém, por se tratar de um corpo não-negro é considerado a emissividade, conforme a Equação (.3).

$$E(T) = \varepsilon * \sigma * (T_{OBJ}^4 - T_{AMB}^4) \quad (.3)$$

Onde,

$E_b(T)$ é a emitância da radiação de corpo negro, em Watts por metro quadrado (W/m^2);

ε é a permissividade, adimensional;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,670 \times 10^{-8} W/m^2K^4$;

T_{OBJ}^4 é a temperatura absoluta do objeto, em Kelvin (K), e

T_{AMB}^4 é a temperatura absoluta do ambiente, em Kelvin (K).

O valor da emissividade inserido no sistema termográfico é definido pelo usuário, de modo que, se este é incorreto o valor de temperatura exibido para o usuário também é incorreto. Sendo necessário que o usuário conheça a emissividade da superfície a qual se deseja mensurar a temperatura, a fim de evitar erros.

1.3 SENSORES TÉRMICOS INFRAVERMELHO

Os sensores térmicos infravermelho comumente utilizados em pirômetros e câmeras termográficas são dispositivos ópticos eletrônicos, constituídos

basicamente por três componentes em um único encapsulamento. Uma lente óptica, com a função de convergir ou focar a radiação infravermelha, proveniente de um objeto emissor, para um detector infravermelho, este por sua vez converte a radiação infravermelha em sinal elétrico, que é condicionado, filtrado e digitalizado através de um circuito eletrônico de processamento digital de sinais (HAMAMATSU, 2011).

Embora a lente óptica e o circuito eletrônico de processamento digital de sinais sejam de substancial importância, o tipo do detector infravermelho é o parâmetro comumente utilizado na escolha do sensor térmico infravermelho.

Os detectores infravermelhos são divididos em: detectores térmicos e detectores quânticos. Detectores quânticos, com características determinadas pela absorção de fótons individuais, possuem resposta limitada a uma relativa faixa de comprimento de onda, e uma dependência com a estrutura atômica do material fotossensível. Detectores térmicos utilizam a elevação da temperatura como resultado da absorção da radiação térmica infravermelha. Sua resposta espectral é independente do comprimento de onda (MONKMAN, 1996).

Entretanto, detectores térmicos possuem tempo de resposta lento se comparados aos detectores quânticos e uma menor capacidade de detecção. Em contraste, os detectores quânticos necessitam de resfriamento para medição precisa, exceto em detectores na banda espectral do infravermelho próximo. Os detectores quânticos são divididos em: fotocondutivos e fotovoltaicos. (HAMAMATSU, 2011).

Os detectores fotocondutivos variam sua resistência elétrica quando a radiação infravermelha incide sobre eles. São construídos com materiais semicondutores, onde fótons com uma determinada energia são capazes de mover elétrons da camada de valência do material, aumentando assim sua condutividade (MONKMAN, 1996).

Os detectores fotovoltaicos utilizam elementos semicondutores, geralmente ligas com materiais dos grupos III–V, IV–VI e II–VI da tabela periódica de elementos químicos, possibilitando junções p-n com uma banda proibida ajustável. A incidência de fótons de radiação infravermelha na liga semicondutora gera uma pequena variação da força eletromotriz, que deve ser amplificada devido a sua baixa amplitude. Os detectores fotovoltaicos são mais rápidos, produzem menos ruído e possuem uma melhor resposta linear se comparados aos fotocondutivos (MONKMAN, 1996).

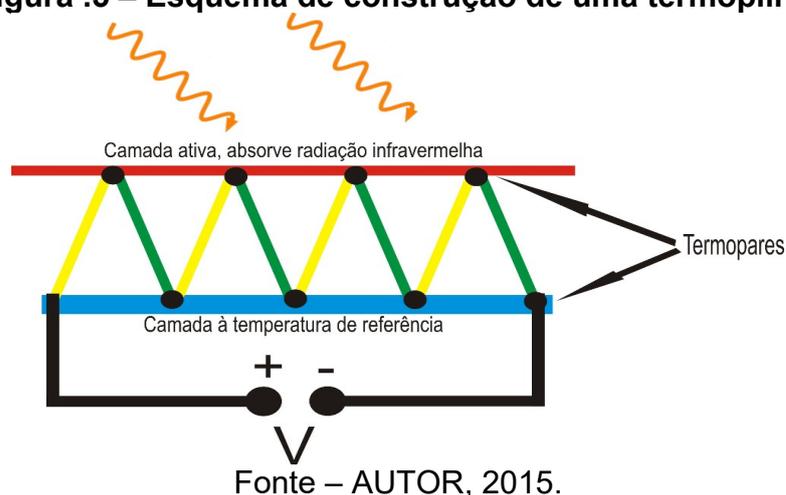
Assim como os detectores quânticos, os detectores térmicos são divididos em dois grupos, de acordo com seu princípio físico de funcionamento, os que utilizam o efeito Seebeck e os que utilizam a propriedade da ferroeletricidade (MONKMAN, 1996).

Os mais comuns detectores de radiação infravermelha funcionam de acordo com o princípio da ferroeletricidade. A ferroeletricidade é uma propriedade de estruturas cristalinas dielétricas que possuem polarização espontânea em determinada faixa de temperatura, esta polarização é invertida com a aplicação de um campo elétrico externo. Os materiais ferroelétricos possuem uma resposta espectral bastante linear a quase todo o espectro infravermelho, porém, perdem suas propriedades quando estão acima da temperatura de Curie, o que acaba por limitar seu campo de aplicações (MONKMAN, 1996).

O efeito Seebeck é definido como a produção de uma força eletromotriz (fem) entre a junção de dois condutores, ou semicondutores, de materiais diferentes quando suas junções são mantidas a temperaturas diferentes (BRITANNICA, 2015). Uma aplicação direta do efeito Seebeck em sensores de temperatura é o termopar. Um termopar necessita de contato direto com o objeto a ser mensurada a temperatura. Com o advento da microeletrônica e da fotolitografia surge a possibilidade de produzir termopares suficientemente pequenos e arranjados em matrizes, com alguns micrômetros quadrados, capazes de operar dentro do espectro infravermelho, conhecidos como termopilhas (MONKMAN, 1996).

A termopilha é uma matriz de termopares ligados em série com polaridades opostas. Os termopares estão colocados entre as regiões quente e fria de uma estrutura, as junções quentes são termicamente isoladas das junções frias. As junções frias são tipicamente conectadas no substrato de silício, que age como um dissipador de calor. As regiões quentes são conectadas a um camada ativa que absorve a radiação infravermelha, assim a força eletromotriz varia conforme a radiação aplicada, como ilustrado na Figura .5. Estes termopares empregam dois materiais termoelétricos diferentes que são colocadas em um diafragma fino tendo uma baixa capacitância e condutividade térmica (GE, 2012).

Figura .5 – Esquema de construção de uma termopilha.



As termopilhas possuem propriedades únicas que não são oferecidas por outros detectores infravermelho, como (GE, 2012):

- Resposta a um amplo espectro infravermelho;
- Não é necessária nenhuma fonte de polarização externa;
- Resposta intrinsecamente estável, apresentando baixo ruído.

Devido a estes motivos e aliado ao baixo custo, comparado aos demais sensores infravermelho comerciais, para a implementação do sistema termográfico proposto neste trabalho é utilizado uma termopilha.

1.4 IMAGEM DE VÍDEO

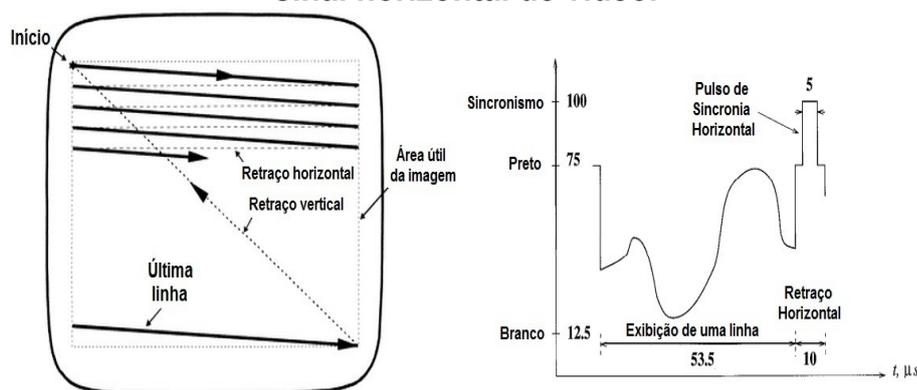
O vídeo é definido de forma empírica como uma seqüência de imagens processadas de forma eletrônica, em um formato analógico ou digital, sendo exibido com freqüência superior a persistência da visão humana afim de criar a ilusão de movimento e continuidade. Na concepção de engenharia, o vídeo é definido como uma tecnologia para captura eletrônica, armazenamento, transmissão e reprodução de imagens estáticas e imagens variáveis no tempo. Onde através de um sinal de vídeo, geralmente um sinal analógico ou digital, unidimensional no tempo, a imagem (informação espaço-temporal) é formada de acordo com um método de varredura predefinido (ARCH, 1999; TEKALP, 1995).

A formação de uma imagem de vídeo analógico em um monitor de computador ou em aparelho de televisão, ocorre através da varredura de um sinal elétrico horizontal da esquerda para a direita e de cima para baixo, exibindo uma linha por vez. Um pulso de sincronismo horizontal, do inglês *horizontal sync*, é gerado para indicar o final de cada linha, isto faz com que o circuito de varredura retorne à borda esquerda, através do intervalo de apagamento horizontal, do inglês *horizontal blanking interval*, (retraço horizontal) e exiba uma nova linha. Durante o intervalo de apagamento horizontal não é exibido informação de sinal de vídeo na tela do monitor. Assim, o processo se repete e todas as linhas são exibidas formando um *frame* (ARCH, 1999; TEKALP, 1995).

Para gerar um novo *frame* o circuito de varredura retorna ao topo da tela, através do pulso de sincronismo vertical, do inglês *vertical sync*, que gera o retraço vertical. Ou seja, assim como ocorre o retraço horizontal ao final de cada linha, ao final de cada *frame* ocorre o pulso de sincronismo vertical seguido do intervalo de apagamento vertical, do inglês *vertical blanking interval*, em que nenhuma informação de sinal de vídeo é exibida. Esta seqüência se repete a uma taxa suficientemente rápida, de modo que as imagens exibidas são consideradas em movimento contínuo (ARCH, 1999; TEKALP, 1995).

A Figura .6 ilustra a formação de uma imagem de vídeo na tela de um monitor, e o respectivo sinal de vídeo para a exibição de uma linha juntamente com o pulso de sincronismo horizontal e o retraço horizontal. A amplitude do sinal de vídeo em função do tempo representa o brilho instantâneo da cor no respectivo ponto físico da tela do monitor.

Figura .6 – Formação da imagem de vídeo na tela de um monitor e respectivo sinal horizontal de vídeo.

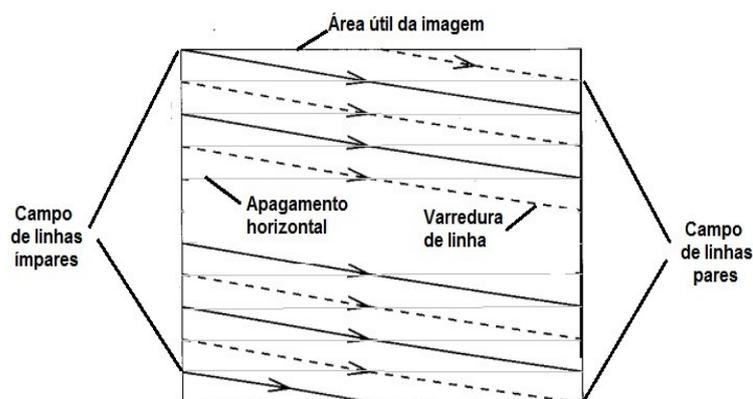


Fonte – Adaptado de ARCH, 1999; TEKALP, 1995.

Existem dois métodos de varredura de vídeo, o progressivo e o entrelaçado. O método ilustrado na Figura .6 é o progressivo, este método consiste na varredura seqüencial das linhas formando um *frame* completo a cada intervalo de tempo definido. Este método é comumente utilizado em monitores de alta definição para computadores, devido a sua maior definição vertical (TEKALP, 1995).

No método de varredura entrelaçada um *frame* é composto pela soma de duas metades alternadas. Cada metade é chamada de *field*, sendo que um *field* é composto de linhas pares e o outro de linhas ímpares. Inicialmente é realizado a varredura do *field* composto pelas linhas ímpares, após todas as linhas ímpares serem exibidas o sinal de sincronismo vertical posiciona o sinal de vídeo no início da tela, para então ser realizado a varredura do *field* composto pelas linhas pares. Desta forma tem-se o *frame* completo exibido na tela, a Figura 1.18 ilustra o método de varredura entrelaçado (TEKALP, 1995).

Figura .7 – Método de varredura entrelaçado.



Fonte – Adaptado de TEKALP, 1995.

Os sinais de sincronismo e de retraço existentes no método de varredura progressivo também existem no método entrelaçado. Sistemas analógicos de transmissão *broadcast* para Televisão como, *National Television System Committee* (NTSC)¹, *Phase Alternating Line* (PAL)² e *Séquentiel Couleur à Mémoire* (SECAM)³, utilizam o método de varredura entrelaçado devido a possibilidade de utilização de larguras de banda menores para a transmissão de vídeo, se comparado ao método de varredura progressivo para uma mesma resolução de quadro (TEKALP, 1995).

Para a exibição de uma imagem de vídeo é necessário a utilização de um hardware que possibilite interpretar o sinais de vídeo de acordo com um padrão. Neste caso, o hardware comumente empregado é o monitor de vídeo. No final da década de 70 os monitores de vídeo começaram a ser utilizados em grande escala, com o passar do tempo a tecnologia foi aprimorada, sendo que atualmente existem quatro principais tecnologias de monitores: tubos de raios catódicos, do inglês *Cathode Ray Tube* (CRT), display de cristal líquido, do inglês *Liquid Crystal Display* (LCD), plasma e diodo emissor de luz orgânico, do inglês *Organic Light Emitting Diode* (OLED). Devido ao fato deste Trabalho utilizar somente monitores do tipo CRT e LCD, as demais tecnologias não estão no escopo de estudo (MARIMOTO, 2010).

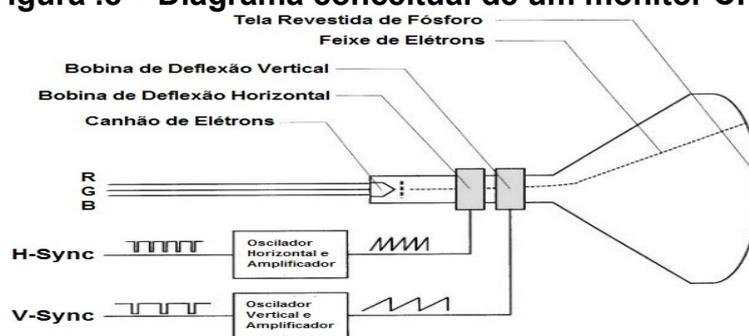
¹ NTSC - Padrão de vídeo composto utilizado em sistemas de televisão analógico, desenvolvido em 1941, é utilizado principalmente na América do Norte e Japão.

² PAL - Padrão de vídeo composto utilizado em sistemas de televisão analógico, desenvolvido em 1962, é utilizado principalmente na Europa, Oceania e Brasil.

³ SECAM - Padrão de vídeo composto utilizado em sistemas de televisão analógico, desenvolvido em 1967, é utilizado principalmente na França e Rússia.

A formação da imagem de vídeo em monitores CRT é bastante rudimentar, pois a tecnologia é a mesma utilizada em aparelhos de televisão da década de 50. Para formar um pixel na tela um feixe concentrado de elétrons é aplicado a uma superfície coberta por células de fósforo, sendo que, através da variação da amplitude do sinal de cor é possível alterar a intensidade do feixe de elétrons que irá iluminar as células de fósforo. O feixe de elétrons é deflexionado, para formar a imagem, seguindo o método de varredura entrelaçado através de um campo eletromagnético formado por duas bobinas, uma para deflexão horizontal e a outra para vertical, conforme ilustra a Figura 1.19 (MARIMOTO, 2010).

Figura .8 – Diagrama conceitual de um monitor CRT.



Fonte – Adaptado de CHU, 2008.

Os sinais de sincronismo e as saídas com informação de cor, no formato RGB, para cada pixel são geradas por um controlador de vídeo externo ao monitor, sendo os dados enviados de forma serial. O tempo necessário para percorrer uma linha é gerado pelo sinal de sincronismo horizontal (H-Sync), enquanto que o tempo de formação de um *frame* é gerado pelo sinal de sincronismo vertical (V-Sync). Nas bordas da tela do monitor o vídeo é desligado durante um intervalo de tempo para efetuar o retraço, ou seja os intervalos de apagamento horizontal e vertical. Estes apagamentos são compostos por intervalos de tempo definidos como, borda da esquerda, do inglês *back porch*, borda da direita, do inglês *front porch*, borda inferior, do inglês *bottom border*, e borda superior, do inglês *top border* (CHU, 2008).

Uma alternativa aos rudimentares monitores CRT, são os monitores LCD. Os monitores LCD são intrinsecamente digitais, não produzem intensos campos eletromagnéticos, geram menos calor, possuem um menor consumo de energia, além de possuírem um volume menor, se comparados ao CRT.

Os monitores de LCD são fabricados em um processo semelhante ao de fabricação de processadores, devido ao fato de se utilizar silício no processo. Porém, um processador é fabricado sobre um *wafer* de silício enquanto que as telas de monitores LCD são fabricadas sobre uma placa de vidro utilizando camadas de silício amorfo depositadas sobre ela, possuindo pequenos sulcos onde é depositado o cristal líquido (MARIMOTO, 2010).

Os cristais líquidos são substâncias que tem sua estrutura molecular alterada quando recebem corrente elétrica. Em seu estado normal, o cristal líquido é transparente, mas ao receber uma carga elétrica torna-se opaco, impedindo a passagem da luz. A formação da imagem nos monitores LCD depende da tecnologia empregada em sua fabricação. As tecnologias conhecidas como matriz passiva e matriz ativa são utilizadas atualmente, sendo que a primeira está em desuso (MARIMOTO, 2010).

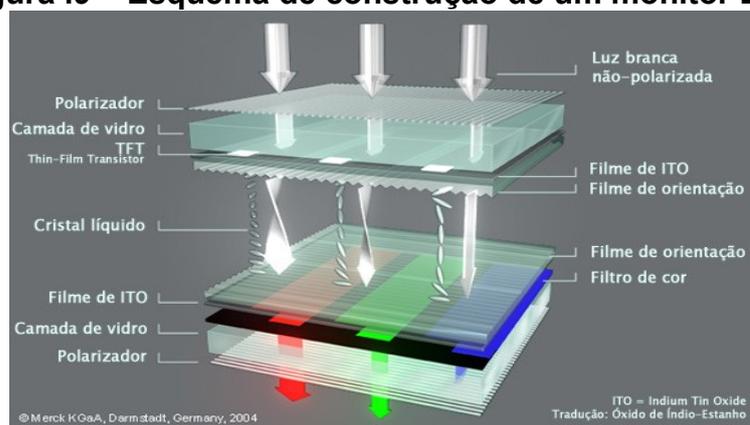
Telas de matriz passiva possuem linhas e colunas de eletrodos distribuídas de modo a formar uma matriz. Os eletrodos são geralmente fabricados com Óxido de Índio-Estanho, um metal semi-transparente. Esta matriz de eletrodos é disposta entre duas peças de material transparente, sendo que a interseção entre a uma linha e uma coluna forma um pixel. Quando é aplicada uma diferença de potencial elétrico entre um eletrodo de linha e de coluna, o cristal líquido altera suas propriedades de transmissão da luz. Este processo é repetido, nas diversas intersecções de eletrodos formando a imagem de vídeo. As telas de matriz passiva possuem limitações de resolução de vídeo, apresentam um ângulo de visão restrito e um tempo maior para a atualização da imagem do que as telas com matriz ativa (MARIMOTO, 2010).

Atualmente a maioria dos monitores LCD são de matriz ativa, neste tipo de tecnologia cada pixel é formado por três pontos, sendo cada ponto controlado por um transistor responsável por aplicar uma diferença de potencial elétrico e gerar cada cor primária, este tipo de tecnologia também é conhecido como Película Fina de Transistores, do inglês Thin-Film Transistor (TFT) (MARIMOTO, 2010).

Na tecnologia TFT, transistores são construídos sobre o vidro do monitor através de um processo de deposição onde é criada uma fina camada de silício amorfo no substrato de vidro. Devido a esta camada de silício não ser totalmente transparente, são utilizados processos de litografia e banho químico para criar a estrutura dos transistores, de modo que apenas a parte ocupada pelos transistores fique sobre o vidro. Esta tecnologia é mais cara, em comparação a matriz passiva, porém, supera as limitações de digitalização existentes na tecnologia anterior (MARIMOTO, 2010).

Devido a tela de LCD não gerar luz própria, é necessário um sistema de iluminação externo. Este sistema de iluminação é geralmente localizado atrás do painel, e chamado de *backlight*. Dois principais tipos de lâmpadas são utilizadas, a lâmpada fluorescente de cátodo frio, que necessita de um inversor que gere uma alta tensão para o acionamento, e os diodos emissores de luz. Estes últimos possuem vantagens como menor consumo de energia, e alimentação em baixa tensão não necessitando de inversores. A Figura .9 apresenta a disposição das camadas que compõem uma tela de LCD (MARIMOTO, 2010).

Figura .9 – Esquema de construção de um monitor LCD.



Fonte – MERCK, 2004.

Os monitores CRT são analógicos e os LCD digitais, porém muitos sistemas de vídeo em computadores utilizam padrões de vídeo analógico, desta forma, para manter a compatibilidade os monitores LCD possuem em seu hardware controlador de vídeo um conversor analógico digital. Pois, em vídeo digital não há necessidade de apagamento ou impulsos de sincronização, uma vez que um computador sabe

exatamente quando a nova linha começa, desde que conhecido o valor de pixels por linha. Assim, todos os impulsos de sincronismo e de apagamento são removidos na conversão analógico digital (ARCH, 1999).

Um importante parâmetro em imagem de vídeo é a resolução. Uma baixa resolução diminui a qualidade da imagem, dificultando a visualização de detalhes. A resolução é definida como a capacidade do sistema de vídeo reproduzir pequenos detalhes, ou seja, está diretamente relacionada com o número de pixels. Em outras palavras a resolução expressa a quantidade de pixels horizontais pela quantidade de pixels verticais. Existem diversos padrões de resolução, sendo alguns dos mais comuns apresentados na Tabela 1 (ARCH, 1999).

Tabela 1 – Padrões de resolução de vídeo

Padrão	Resolução Horizontal (Pixels)	Resolução Vertical (Pixels)	Resolução do Quadro (Pixels)
QVGA	320	240	76800
VGA	640	480	307200
SVGA	800	600	480000
XGA	1024	768	786432
WXGA	1280	800	1024000
WXGA+	1440	900	1296000
SXGA	1280	1024	1310720
SXGA+	1400	1050	1470000
UXGA	1600	1200	1920000
WSXGA	1680	1050	1764000
WUXGA	1920	1200	2304000
WQXGA	2560	1600	4096000
QSXGA	2560	2048	5242880

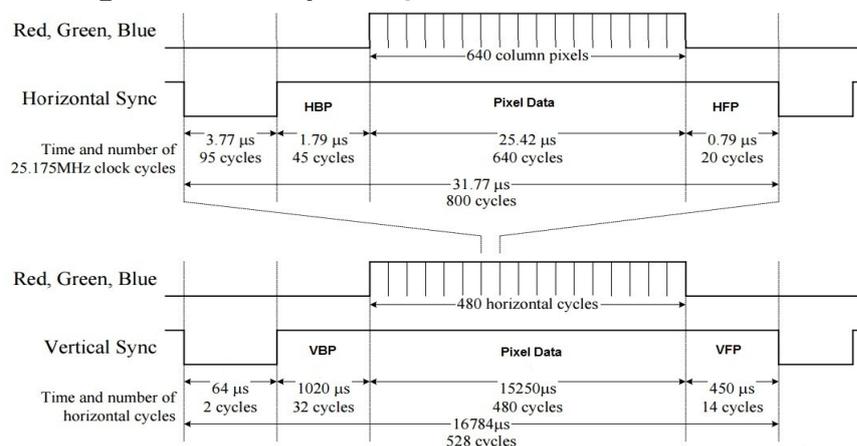
Fonte – Adaptado de REINMEDICAL, 2014.

Em 1987 é desenvolvido pela IBM o padrão conhecido como matriz gráfica de vídeo ou VGA, este termo é freqüentemente utilizado para se referir a resolução de 640x480 pixels, independentemente do hardware utilizado para reproduzir a imagem. Ou seja, tanto monitores CRT como LCD utilizam o padrão VGA para reprodução de imagem.

É comum o padrão VGA ser referido como sendo o conector de 15 pinos tipo D-sub, porém isto é um equívoco, pois, o VGA trata-se de um padrão dedicado a

geração de imagem de vídeo com uma resolução definida, conforme apresentado na Tabela 1, sendo implementado em hardware conforme diagrama de temporização, ilustrado na Figura 1.21.

Figura .10 – Diagrama de temporização do sincronismo horizontal e vertical.



Fonte – Adaptado de SANCHEZ, 2007.

O padrão VGA possui dois sinais para sincronismo, um horizontal e outro vertical. E três sinais analógicos de cor, utilizando o sistema de cores primárias RGB, que variam sua amplitude entre 0 V e 0,7 V. O método de varredura utilizado é o progressivo, assim quando é realizado o retraço, vertical ou horizontal, a amplitude dos sinais de cores é de 0V correspondendo a cor preta.

Conforme Figura .10, um ciclo de varredura horizontal possui duração de 31,77 µs, sendo 25,42 µs informação de cor. Considerando a resolução VGA, cada pixel é exibido a uma taxa de 25,175 MHz. Já um ciclo de varredura vertical, composto por 480 ciclos de varredura horizontal, possui duração de 16,784 ms, ou seja, a renovação da tela acontece a uma frequência de 59,58 Hz.

Devido ao padrão VGA ser bastante difundido na maioria dos monitores de vídeo, a implementação de um controlador VGA, em hardware configurável, possibilita exibição de imagens termográficas em um uma ampla gama de dispositivos de exibição de vídeo. Aumentando, desta forma, a integração do sistema para análise térmica proposto neste Trabalho com outros hardwares. A seção seguinte aborda o estudo de hardware reconfigurável.

1.5 HARDWARE RECONFIGURÁVEL

A possibilidade de alterar funcionalidades no hardware de um sistema mesmo depois de fabricado, proporciona flexibilidade e melhora contínua do produto final. Isto é possível com a utilização de dispositivos de hardware reconfigurável, pois, estes dispositivos permitem ao usuário implementar circuitos complexos e fazer alterações durante qualquer momento da etapa de desenvolvimento, sendo uma alternativa a manufatura de um *Application Specific Integrated Circuits* (ASIC). Devido a estas características é comum sua utilização em prototipação de circuitos eletrônicos.

Os dispositivos de hardware reconfigurável surgiram em meados da década de 1970, tendo como propósito principal a fabricação de circuitos lógicos combinacionais que fossem programáveis em hardware, ao contrário dos microprocessadores que possuem um hardware fixo e executam instruções definidas em software, os dispositivos de hardware reconfigurável, também conhecidos como *Programmable Logic Device* (PLD), são circuitos integrados de uso geral com um hardware que é reconfigurado pelo próprio usuário, para aplicações específicas (PEDRONI, 2008).

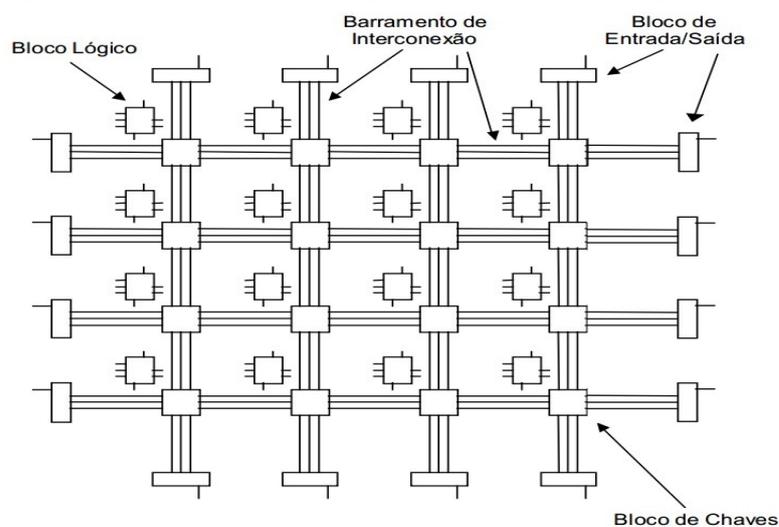
Os dispositivos de hardware reconfigurável são divididos em três grupos, de acordo com sua arquitetura: *Simple Programmable Logic Device* (SPLD), *Complex Programmable Logic Device* (CPLD) e *Field Programmable Gate Array* (FPGA) (PEDRONI, 2008).

Os SPLDs, desenvolvidos pela empresa Philips no início de 1970, implementam circuitos lógicos combinacionais, uma vez que possuem somente portas lógicas convencionais. No início da década de 1980 são acrescentados outros circuitos lógicos, como flip-flops e multiplexadores. Entretanto, estes são dispositivos simples e de baixa capacidade, que tipicamente contêm menos de 600 portas lógicas (PEDRONI, 2008).

Introduzidos no mercado internacional pela empresa Altera, em 1983, os CPLDs implementam capacidade lógica de cerca de até 50 dispositivos PLDs típicos, possuindo características como, alto desempenho, baixo custo por função e alta capacidade de integração, além de possuírem uma memória de configuração não volátil (PEDRONI, 2008).

Os FPGAs, lançados em meados da década de 1980 pela empresa Xilinx, se diferem dos CPLDs em muitos aspectos como, arquitetura, tecnologia, características embutidas, tamanho, desempenho e custo. Um CPLD possui seus blocos lógicos ordenados quase que como um vetor, enquanto que um FPGA possui uma distribuição dos blocos lógicos em matriz. A arquitetura geral de um FPGA genérico é ilustrada na Figura .11 (PEDRONI, 2008).

Figura .11 – Arquitetura geral de um FPGA genérico.



Fonte – Adaptado de TOROK, 2001.

Desta forma, a arquitetura de um FPGA genérico é composta por uma matriz de elementos agrupados em blocos lógicos configuráveis que são interconectados, através dos barramento de interconexão e dos blocos de chaves configuráveis pelo usuário, à outros blocos lógicos. Sendo que a interface com dispositivos externos é realizada através de blocos de entrada/saída configuráveis (TOROK, 2001).

Os blocos lógicos são elementos essenciais em um FPGA, sua construção baseia-se na utilização de *look-up tables* (LUTs), que são tabelas verdades que

possuem quatro ou cinco entradas e que permitem implementar qualquer função lógica. Além dos indispensáveis blocos lógicos programáveis, FPGAs modernos incluem também outros blocos úteis no desenvolvimento de projetos grandes e/ou complexos. Esses blocos normalmente são: Synchronous Dynamic Random Access Memory (SRAM), Digital Signal Processor (DSP) e circuitos Phase-Locked Loop (PLL), formando um dispositivo completo de desenvolvimento (TOROK, 2001; TERROSO, 1998).

Devido a sua arquitetura com distribuição matricial dos elementos lógicos, o FPGA é ideal para processamento de imagens e vídeo, pois, é possível implementar a lógica necessária para uma aplicação através da construção do hardware, com as funções específicas da aplicação, de forma separada. Isto resulta em maior velocidade, uma vez que cada hardware da aplicação opera de forma independente e paralela aos outros ().

De forma que, um vídeo em resolução VGA transmitindo a partir de uma câmera a 30 quadros por segundo produz aproximadamente 10 milhões de pixels por segundo, deste modo qualquer processamento significativo requer muitas operações a serem realizadas para cada pixel, fazendo com que sistemas microprocessados necessitem de um elevado clock para a realização das operações, de forma a não perder informação. Assim, realizando várias operações em paralelo é possível reduzir significativamente a velocidade de clock e não comprometer a informação.

Mesmo sendo intrinsecamente paralelo o FPGA também executa operações seqüenciais, assim como um microprocessador, pois, isto torna-se necessário em determinadas aplicações. Porém, para implementar uma configuração de hardware, sendo ela seqüencial ou paralela, em um FPGA, é necessário a utilização de linguagens de descrição de hardware. A próxima seção aborda os conceitos e a estrutura do código de uma linguagem de descrição de hardware ().

1.6 LINGUAGEM DE DESCRIÇÃO DE HARDWARE

A abordagem tradicional para descrever circuitos eletrônicos é através de diagramas esquemáticos, estes proporcionam uma representação gráfica dos componentes e das conexões. No entanto o nível de abstração de diagramas esquemáticos é tipicamente muito baixo para representar sistemas complexos. Surge assim o conceito de linguagem de descrição de hardware (*Hardware Description Language* - HDL), como uma ferramenta que proporcione diferentes níveis de abstração na descrição de circuitos eletrônicos.

Em meados da década de 1980 é concebida a primeira linguagem de descrição de hardware, *Very High Speed Hardware Description Language* (VHDL), devido a necessidade de uma ferramenta computacional para projetos e documentação do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*Defense Advanced Research Projects Agency* - DARPA), sendo a primeira HDL a ser padronizada pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), recebendo a denominação de IEEE 1076-83 e IEEE 1076-93, respectivamente. Possui também um padrão adicional, o IEEE 1164, que foi estabelecido posteriormente para introduzir sistemas lógicos mutivariáveis ().

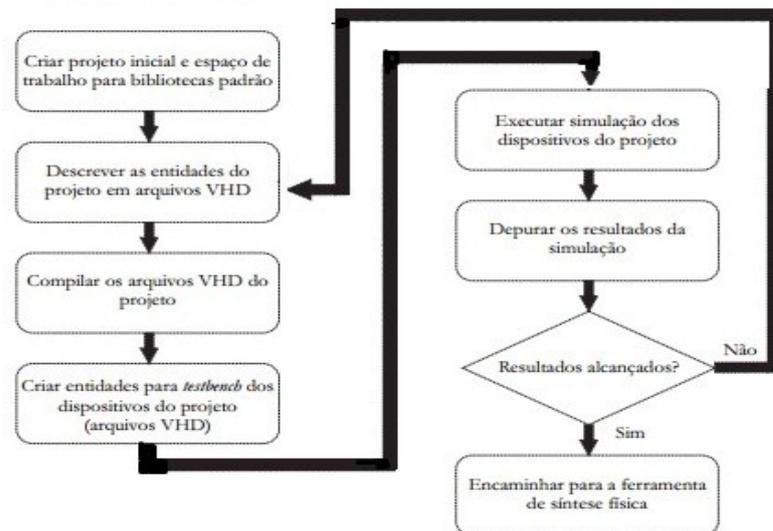
As duas principais HDLs são VHDL e Verilog, devido a utilização de VHDL, neste Trabalho, não será abordado o estudo de Verilog ou qualquer outra HDL. Uma vez que HDLs possuem código independente de tecnologia e de fabricante, sendo portáteis e reutilizáveis, o domínio e compreensão de apenas uma HDL é suficiente para implementação de qualquer projeto em dispositivos FPGAs ().

Desde que o hardware de um FPGA é inerentemente paralelo, é necessário que um HDL seja capaz de especificar o modelo de comportamento concorrente até o nível da porta lógica. Isso faz com que o HDL se diferencie das linguagens de software convencionais, que são principalmente seqüenciais ().

Deste modo, uma descrição em VHDL possui três características essenciais de modelagem, que são: abstração, hierarquia e modularidade. A abstração permite

a descrição das partes de um sistema através de diferentes níveis, como, comportamental, transferência entre registradores e funcional em nível de portas lógicas. Assim, o projetista divide o projeto em blocos funcionais (módulos) e então interconectá-los em um único módulo, atribuindo níveis hierárquicos aos módulos que formam o projeto, sendo que estes assumem diferentes níveis de abstração. A partir destas características de modelagem, é necessário seguir um fluxo de projeto conforme ilustra a Figura .12 ().

Figura .12 – Fluxo de projeto básico para modelagem em VHDL.



Fonte – Adaptado de TOROK, 2011.

O fluxo de projeto da Figura .12 apresenta a metodologia Top-Down, em que o projetista inicia a descrição do hardware no nível de abstração mais elevado e simula o sistema, para então analisar os resultados, e estando este de acordo com o comportamento esperado é enviado para a ferramenta de síntese física.

Para a descrição de um código em VHDL, que compreende o nível de abstração comportamental, é necessário seguir uma estrutura, conforme apresenta a Figura .13.

Figura .13 – Estrutura de um código em VHDL.

```

1 -----
2 LIBRARY ieee;
3 USE ieee.std_logic_1164.all;
4 -----
5 ENTITY buffered_mux IS
6     PORT (a, b, c, d: IN STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0);
7           sel: IN INTEGER RANGE 0 TO 3;
8           ena: IN STD_LOGIC;
9           y: OUT STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0));
10 END buffered_mux;
11 -----
12 ARCHITECTURE myarch OF buffered_mux IS
13     SIGNAL x: STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0);
14 BEGIN
15     x <= a WHEN sel=0 ELSE --Mux
16         b WHEN sel=1 ELSE
17         c WHEN sel=2 ELSE
18         d;
19     y <= x WHEN ena='1' ELSE --Tristate buffer
20         (OTHERS => 'Z');
21 END myarch;
22 -----

```

Fonte – PEDRONI, 2008.

O código inicia, conforme Figura .13, com a declaração de todas as bibliotecas (*Library declarations*) e pacotes que o compilador necessitará para processar o projeto, a biblioteca *std*, que possui as definições para os tipos de dados básicos, e *work*, que indica o diretório onde estão armazenados os arquivos do projeto, não são declaradas, pois, são disponibilizadas automaticamente. Porém, é necessário a inclusão da biblioteca *IEEE* devido ao pacote *std_logic_1164* que possui o subtipo *STD_LOGIC*, este subtipo adiciona valores de alta impedância ('Z') e *don't care* ('-') para serem utilizados no projeto. Assim, para declarar uma biblioteca e um dos seus pacotes é necessário primeiro declarar o nome da biblioteca e depois o nome do pacote (PEDRONI, 2008).

Na Entidade (*Entity*), é especificado uma lista (*PORT*) com todas as portas de entrada e saída do circuito. Estas portas geralmente são de entrada (IN), saída (OUT), bidirecionais (INOUT) ou BUFFER, e a estas atribuí-se os seguintes sinais: BIT, BIT_VECTOR, STD_LOGIC, STD_LOGIC_VECTOR, BOOLEAN, INTEGER, dentre outros (PEDRONI, 2008).

E a última parte do código é a Arquitetura (*Architecture*), onde é realizado a descrição do comportamento do circuito propriamente dito. Antes do BEGIN, conforme Figura .13, é possível utilizar uma grande variedade de declarações, das

quais as mais utilizadas são: declarações de tipo (TYPE), sinal (SIGNAL), constante (CONSTANT), componente (COMPONENT) e função (FUNCTION). Após o BEGIN é descrito o comportamento do circuito, possibilitando a este ser combinacional ou seqüencial, sendo que para o último modo é necessário que se utilize o comando PROCESS (PEDRONI, 2008).

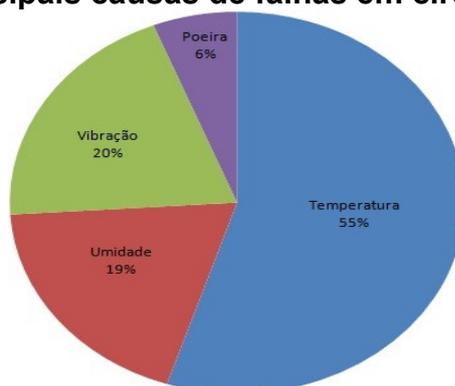
Assim, através desta estrutura é descrito um circuito em VHDL no nível comportamental. Seguindo este processo e modularizando as descrições em determinado nível hierárquico forma-se o projeto como um todo, para posterior simulação e síntese. Ou seja, segue-se a metodologia Top-Down (PEDRONI, 2008).

Esta seção encerra o estudo para o desenvolvimento de hardware, a próxima seção aborda a análise térmica em circuitos eletrônicos.

1.7 ANÁLISE TÉRMICA EM CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Um problema recorrente no projeto de um circuito eletrônico é a remoção do calor gerado pelos dispositivos que o compõem, para que as condições de funcionamento do ponto de vista operacional sejam satisfeitas. Com base em uma pesquisa realizada pela Força Aérea dos EUA, conforme Figura .14, mais de 50% de todas as falhas em circuitos eletrônicos são devido a problemas relacionados à temperatura.

Figura .14 – Principais causas de falhas em circuitos eletrônicos.

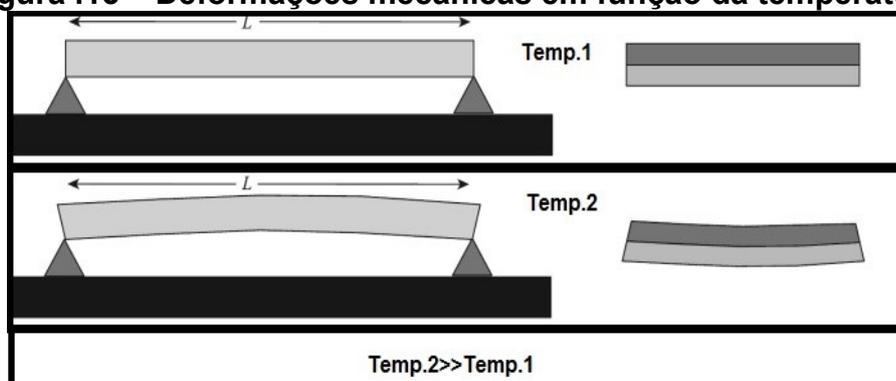


Fonte – Adaptado de YEH, 2002.

Então quando um circuito eletrônico não é devidamente arrefecido, sua temperatura interna é gradativamente aumentada a ponto deste apresentar uma falha. As falhas devido ao aumento da temperatura são classificadas em mecânicas, elétricas e de corrosão.

As falhas mecânicas são devido a deformação, trinca e fratura no material ou em ligações entre materiais, conforme ilustra a Figura .16. Estes fatores ocorrem devido a um acúmulo de tensão no material, conseqüência do movimento de expansão e retração de acordo com sua dilatação térmica e a forma em que está fixado à outra superfície. Em casos de junções de dois ou mais materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, e submetidos a diferentes temperaturas, a deformação de um material acaba por deformar o outro, levando-o a trincar ou fraturar. Estes fatores são comumente encontrados em placas de circuito impresso, devido a distribuição não uniforme de temperaturas (SHABANY, 2009).

Figura .15 – Deformações mecânicas em função da temperatura.



Fonte – Adaptado de SHABANY, 2009.

A falha por corrosão ocorre devido à reação de um material com o ambiente a sua volta, os dois tipos mais comuns são: a corrosão molhada e a corrosão seca. A oxidação nas ligações entre os componentes e a placa de circuito impresso é chamado de corrosão molhada e ocorre quando há a contaminação de íons e umidade, originando um caminho condutivo que resulta em uma possível ligação entre trilhas adjacentes, causando curto-circuito. Na corrosão seca ocorre um processo acelerado de fadiga dos materiais, ocorre geralmente em dispositivos de alta tensão elétrica com temperaturas que ultrapassam 300 °C (SHABANY, 2009).

Contudo, as falhas elétricas devido à temperatura afetam inversamente o desempenho dos circuitos eletrônicos, sendo intermitentes ou permanentes, dentre estas tem-se as seguintes (SHABANY, 2009):

- Fuga térmica: a resistência ativa dos transistores de potência aumenta com a temperatura, que se não é corretamente dissipada, ocasiona a queima do componente.
- Sobre-estresse elétrico: uma redução da resistência elétrica do silício ocorre devido ao aumento de temperatura, conseqüentemente o fluxo de corrente aumenta gerando mais calor na junção, e resultando em dano permanente ao componente.
- Contaminação iônica: ocorre durante o encapsulamento, soldagem ou operação de determinado componente de um circuito eletrônico. Como a mobilidade de íons é dependente da temperatura, o aumento desta aumenta a mobilidade de íons carregados eletricamente gerando falhas intermitentes em componentes.
- Eletromigração: é um fenômeno que ocorre quando uma corrente de alta densidade, e conseqüente alta temperatura, flui em um sólido alterando sua estrutura devido à perda de energia cinética dos elétrons para os átomos, ou seja, os elétrons acabam batendo e deslocando os átomos de sua posição original, criando espaços onde não havia, causando falhas nos circuitos.

Desta forma, operar circuitos eletrônicos com temperaturas mais baixas diminui o tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failures* - MTBF), ou seja, o tempo médio entre duas falhas neste circuito. A Equação (.4 apresenta a dependência do MTBF com a temperatura (SHABANY, 2009).

$$MTBF \propto e^{\frac{C}{T}} \quad (.4)$$

Onde,

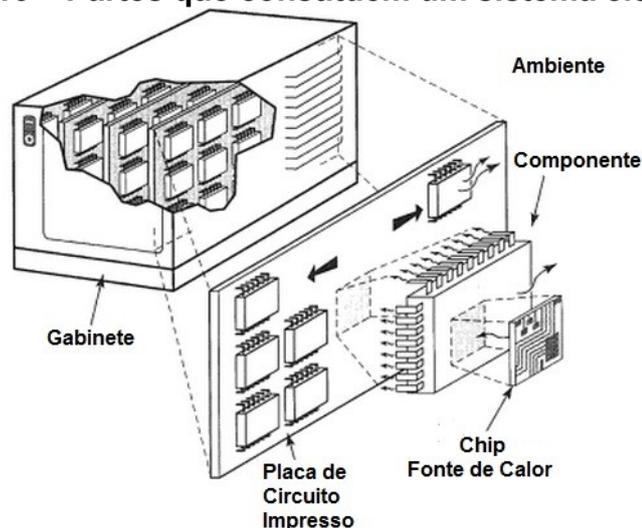
C é uma constante específica do sistema, e
 T é a temperatura absoluta do sistema em Kelvin (K).

O MTBF de um sistema aumenta exponencialmente com o inverso da temperatura, conforme a mesma diminui. Desta forma a confiabilidade de um sistema é inversamente proporcional ao seu MTBF.

Assim, surge a necessidade do projeto térmico de circuitos eletrônicos como forma de garantir maior performance e confiabilidade do produto final. O projeto térmico é definido como um processo em que as técnicas de análise e as ferramentas de transferência de calor apropriadas são usadas para resfriar adequadamente os componentes eletrônicos dentro de um sistema (SHABANY, 2009).

Onde, sistema refere-se as diferentes partes que compõem o projeto eletrônico, como: o componente, a placa de circuito impresso, o gabinete e até mesmo o ambiente em que o mesmo está inserido. A Figura .16 ilustra as diferentes partes de um sistema eletrônico.

Figura .16 – Partes que constituem um sistema eletrônico.



Fonte – Adaptado de AZAR, 1997.

Uma vez que há muitas fontes de calor em um circuito eletrônico, é comum considerar apenas o calor gerado pelo funcionamento de dispositivos ativos, porém,

resistores, indutores e capacitores, são importantes fontes de calor. A localização do calor é tão importante quanto a quantidade, assim, através da hierarquia de níveis, apresentada na Figura .16, se faz necessário a utilização de diferentes abordagens de análise térmica, e métodos de arrefecimento.

O projeto térmico se utiliza de ferramentas de análise térmica que se dividem em três categorias: analítica, simulação computacional utilizando métodos numéricos e experimental. Sendo a análise térmica experimental a que possibilita uma validação mais precisa do projeto térmico viável (SHABANY, 2009).

Devido ser de difícil abordagem, e muitas vezes utilizar de métodos e valores empíricos a análise térmica através de métodos analíticos ou numéricos resulta em aproximações por vezes grosseiras (SERGENT, 1998).

Deste modo, a análise térmica experimental é geralmente utilizada para verificar se um protótipo ou produto atende aos requisitos do projeto, ou para calibrar um modelo térmico que é utilizado para a concepção do projeto térmico do produto. Pois, um protótipo possibilita uma análise com todas as variáveis que influenciam o comportamento térmico do produto, possibilitando verificar se o sistema é arrefecido de forma adequada, para os diferentes ambientes de operação do mesmo (SHABANY, 2009).

Por fim, dentre os diversos métodos para a análise térmica experimental, como utilização de termopares, diodos sensíveis à temperatura, chips de teste térmico, termômetros infravermelho pontuais, fitas de cristal líquido e câmeras termográficas, sendo que cada técnica possui vantagens e desvantagens, a utilização de um sistema termográfico é o método mais adequado, uma vez que resulta em uma imagem com a distribuição da temperatura de todo o circuito, o que proporciona uma melhor análise para a correção de falhas.

1.8 PROTOCOLO I²C

1.9 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

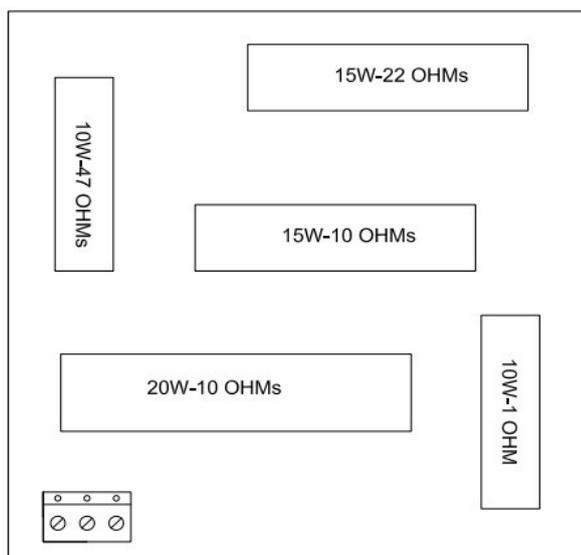
1.10 PLATAFORMA DE PROTOTIPAÇÃO E HARDWARE

2 DESENVOLVIMENTO DO GABARITO TÉRMICO

Neste Capítulo é apresentado o desenvolvimento do gabarito térmico, um circuito composto por resistores axiais de fio enrolado e encapsulamento de cerâmica, com diferentes resistências e potências, soldados em uma placa de circuito impresso de substrato FR-4, para a análise térmica, simulação por software de elementos finitos e posterior validação do sistema termográfico proposto neste Trabalho.

A disposição dos componentes é definida de forma a possibilitar uma aproximação da utilizada em circuitos eletrônicos convencionais, nenhuma ferramenta de otimização de posicionamento é utilizada. A Figura 2.1 apresenta o leiaute com a disposição dos componentes do gabarito térmico.

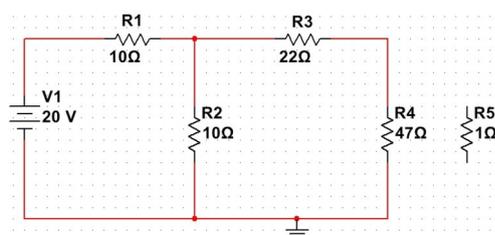
Figura .1 – Leiaute do gabarito térmico.



Fonte – AUTOR, 2015.

O resistor de $1\Omega/10W$, no canto inferior direito, não está conectado ao circuito elétrico, logo não dissipa calor, sua função é servir como elemento passivo acentuando o gradiente de temperatura naquela região. O diagrama do circuito elétrico é apresentado na Figura 2.2.

Figura .2 – Diagrama elétrico do gabarito térmico.



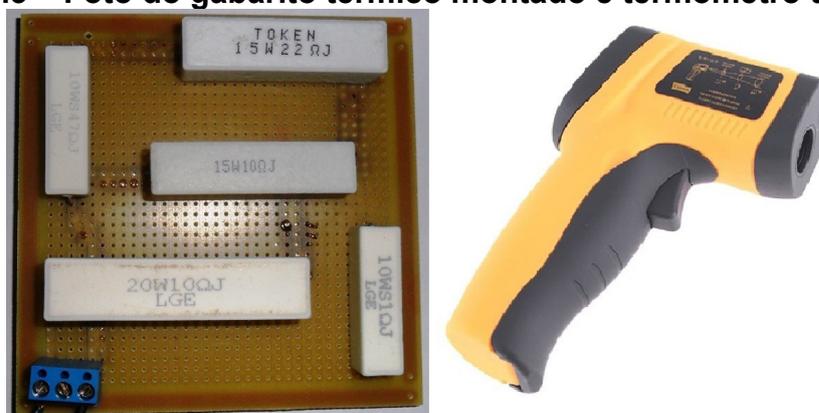
Fonte – AUTOR, 2015.

A resistência equivalente do circuito elétrico é de $18,734\ \Omega$, assim com a tensão de 20 V aplicada obtém-se uma corrente de 1,068 A. Experimentalmente este é o valor máximo de corrente para que a placa de circuito impresso, com o substrato FR-4, não se degrade completamente, pois, a dissipação de calor dos resistores para o substrato FR-4 acaba por limitar este valor de corrente.

Na Figura 2.3 é apresentado uma foto do gabarito térmico montado e o respectivo termômetro infravermelho utilizado. É possível perceber que após a

realização das medições, o substrato da placa de circuito impresso obteve avarias em função da temperatura.

Figura .3 – Foto do gabarito térmico montado e termômetro utilizado.



Fonte – AUTOR, 2015.

Alimentando o circuito com uma tensão variando de 1 V até 20 V é realizado a medição da temperatura, através de um termômetro infravermelho pontual. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

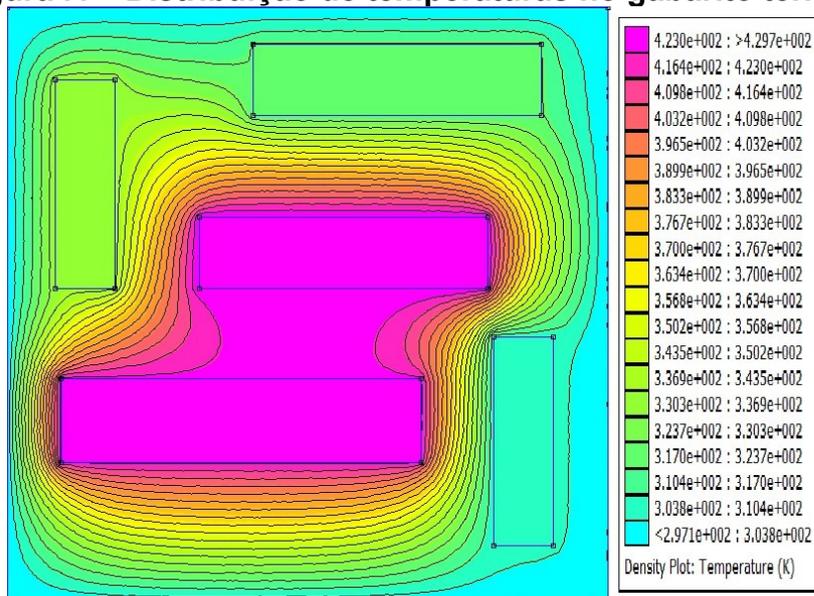
Tabela 2 – Temperaturas medidas nos resistores do gabarito térmico.

	1V	2V	3V	4V	5V	6V	7V	8V	9V	10V	12V	15V	20V
R1 - 20W/10R	24,9 °C	25,3 °C	25,8 °C	27,8 °C	29,6 °C	31,8 °C	35,6 °C	42,7 °C	51,8 °C	59,1 °C	71,1 °C	111,2 °C	151,2 °C
R2 - 15W/10R	24,7 °C	25,1 °C	26,2 °C	28,1 °C	30,2 °C	32,7 °C	37,9 °C	46,1 °C	53,1 °C	61,8 °C	77,3 °C	111,4 °C	156,5°C
R3 - 15W/22R	24,4 °C	24,2 °C	24,3 °C	24,5 °C	24,4 °C	24,6 °C	25,2 °C	26,1 °C	27,4 °C	29,1 °C	31,3 °C	39,1 °C	45,4 °C
R4 - 10W/47R	24,5 °C	24,7 °C	24,9 °C	25,1 °C	25,5 °C	26,1 °C	27,5 °C	30,1 °C	32,7 °C	34,4 °C	39,2 °C	53,4 °C	62,9 °C
R5 - 10W/1R	24,3 °C	24,1 °C	24,2 °C	24,2 °C	24,1 °C	23,9 °C	24,3 °C	24,7 °C	25,1 °C	26,2 °C	27,1 °C	30,4 °C	33,8 °C

Fonte – AUTOR, 2015.

De posse dos valores de temperatura aferidos no centro da superfície superior de cada resistor, os dados são inseridos no software de elementos finitos Finite *Element Method Magnetics* (FEMM). Utilizando o módulo para transferência de calor e aplicando como condição de contorno, externo ao circuito, a temperatura ambiente de aproximadamente 24 °C, obtém-se a distribuição da temperatura e as linhas de equipotenciais, conforme Figura 2.4.

Figura .4 – Distribuição de temperaturas no gabarito térmico.



Fonte – AUTOR, 2015.

A distribuição de temperaturas, conforme Figura 2.4, possibilita uma melhor análise térmica do circuito, uma vez que é possível observar a interação entre corpos de maior e menor temperatura, e quais necessitam de arrefecimento, assim como a melhor geometria de dissipador que venha a ser utilizada.

Porém esta abordagem numérica é pobre em precisão, devido que muitas variáveis não foram consideradas, como os efeitos da convecção, o fluxo de ar incidente sobre o circuito, a emissividade de cada componente, e a condução do calor em toda a superfície dos resistores.

Assim, é válido verificar que uma imagem térmica possibilita uma melhor análise do circuito, porém, é necessário que esta seja proveniente de um método experimental, para que assim se avalie de forma mais precisa o comportamento térmico do circuito. O gabarito térmico desenvolvido é utilizado, no Trabalho de Conclusão de Curso II, para validação do sistema termográfico proposto neste Trabalho, e também submetido a uma câmera termográfica comercial para a comparação entre os sistemas.

3 PROJETO DO SISTEMA PROPOSTO

Neste Capítulo é apresentado o projeto do protótipo do sistema termográfico para análise térmica de circuitos eletrônicos, suas especificações e o hardware utilizado.

Para o desenvolvimento deste protótipo utilizou-se como premissa inicial o baixo custo, pois, sistemas termográficos geralmente são caros, fazendo com que pequenas empresas e *hobbyistas* acabem por utilizar outros métodos de análise térmica. O valor máximo admissível para o projeto é de US \$200, uma vez que este é o menor valor das câmeras termográficas de baixa resolução disponíveis comercialmente.

Como especificação de projeto, além do custo, está a utilização de um FPGA da família SPARTAN-3E, fabricante Xilinx, com especificações conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações técnicas FPGA SPARTAN-3E.

SPARTAN-3E - Especificações Técnicas	
Part Number	XC3S500E
Sistema de Portas	500K
Células Lógicas	10,476
Blocos RAM Bits	360K
RAM Distribuida Bits	73K
DCMs	4
Multiplicadores	20
I/O's Padrões	18
Max Single Ended I/O	232
Max Pares Diferenciais I/O	92

Fonte – XILINX, 2015.

A câmera utilizada é do tipo CMOS, utilizando o padrão VGA, modelo OV7670 da fabricante Omnivision, as especificações constam na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações técnicas câmera CMOS VGA.

OV7670 - Especificações Técnicas	
Matriz fotossensível	640 x 480
Tensão	2,5 V - 3,0 V
Potência de Operação	60 mW/15fps VGAYUV
Modo Sleep	< 20 μ A
Temperatura de Operação	-30 a 70 °C
Formato de Saída	YUV/YCbCr4: 2 2 RGB565/555/444 GRB4: 02:02 Raw RGB de Dados (8 dígitos)
Tamanho da lente	1/6"
Ângulo de visão	25 graus
Max frame Rate	30fps VGA
Sensibilidade	1,3 V / (Lux-sec)
Signal to Noise Ratio	46 dB
DynamicRange	52 dB
Exposição eletrônica	1-510 linha
Cobertura Pixel	3.6 μ m x 3.6 μ m
Dimensões	3,5 x 3,5 cm

Fonte – OMNIVISION, 2015.

E um sensor infravermelho composto por uma matriz de termopilhas da fabricante Melexis, o MLX90620, com as especificações conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas sensor infravermelho.

MLX90620 - Especificações Técnicas	
Matriz de Termopilhas	16x4
Tensão	2,6 - 3,0V
Temp. Ambiente	-40 a 85 °C
Temp. Objeto	-20 a 300 °C
Campo de Visão	60° x 15°
Protocolo de Comunicação	I2C/SMBus
Resposta Espectral	3 a 14 μ m
Consumo de Corrente	< 7 mA

Fonte – MELEXIS, 2012

A Figura 3.1 apresenta o diagrama esquemático básico do protótipo proposto. O hardware do sistema será descrito em VHDL e sintetizado através da ferramenta *ISE WebPACK Design Software*, da fabricante Xilinx.

Figura .1 – Diagrama em blocos básico do protótipo proposto.



Fonte – Autor, 2015.

O objetivo geral do protótipo é obter uma imagem termográfica em um monitor de vídeo padrão VGA. Para isso, a imagem proveniente da câmera CMOS VGA é filtrada para que somente as bordas dos objetos da imagem sejam realçadas, e é atribuído cores aos valores de temperatura do sensor infravermelho, gerando um mapa colorido de temperaturas que será sobreposto a imagem com as bordas.

Assim, para o desenvolvimento e validação do protótipo é necessário a elaboração das seguintes etapas:

- Descrição de hardware para comunicação com a câmera CMOS VGA;
- Descrição de hardware para comunicação com o sensor infravermelho MLX90620;
- Descrição de hardware para uso de *buffer* em memória RAM;
- Descrição de hardware para implementação do filtro de bordas de Sobel;
- Descrição de hardware do controlador VGA para monitor de vídeo;
- Descrição de hardware do módulo de interconexão;
- Validação do sistema através do uso do gabarito térmico e câmera termográfica comercial;
- Simulação em software de elementos finitos e comparação com valores experimentais;
- Entrega do relatório para apreciação da banca.

Estas etapas são implementadas no Trabalho de Conclusão de Curso II.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o estudo realizado neste volume, é viável a implementação de um sistema termográfico para análise térmica de circuitos eletrônicos. A análise térmica experimental possibilita resultados mais precisos, uma vez que métodos analíticos e numéricos acabam por utilizar dados empíricos que geralmente resultam em erros grosseiros.

A utilização de um FPGA para o protótipo possibilita um melhor processamento das imagens e facilidades de alteração no projeto, assim como, a utilização do padrão de vídeo VGA que está disponível na grande maioria dos monitores de vídeo.

Assim, o projeto será implementado no Trabalho de Conclusão II seguindo a premissa inicial de baixo custo e fácil integração com monitores de vídeo, servindo como ferramenta de auxílio na análise térmica de circuitos eletrônicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCH, C. Luther ANDREW, F. Inglis. **Video Engineering**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1999. 551p.

AUER, Siegfried. Imaging by dust rays: a dust ray camera. **Optica Acta**, Moorhead, v. 29, n. 10, p. 1421 - 1426, 1982.

AZAR, Kaveh. **Thermal Measurements in Electronic Cooling**. 1.ed. New York: CRC Press, 1997. 478p.

BAILEY, Donald G.. **Design for Embedded Image Processing on FPGAs**. 1.ed. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. 416p.

BRITANNICA, Editors Encyclopædia. Efeito Seebeck. In: **Enciclopédia Britânica**. Web: Encyclopædia Britannica, Inc., 2015. Disponível em: <<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/532358/Seebeck-effect>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

CHU, Pong P. **FPGA Prototyping by Verilog Examples: Xilinx Spartan 3**. 3.ed. New York: Wiley, 2008. 508p.

DOWNTON, A.; CROOKES, D. **Parallel architectures for image processing**. Electronics & Communications Engineering Journal, Colchester, v. 10, n. 3, p. 139 - 151, jun. 1998.

FLIR, Systems. **The ultimate infrared handbook for R&D professionals: A resource guide for using infrared in the research and development industry**. 1.ed. Oregon: FLIR AB, 2013. 44p.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128p.

GE, General Electric Company. **Thermopile IR Sensor Applications**: Application Note. 2012. 4p. Disponível em: <<http://www.ge-mcs.com/download/temperature/930-164A-LR.PDF>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard C. **Processamento digital de imagens**. 3.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 640p.

HAMAMATSU, PHOTONICS. **Characteristics and use of infrared detectors**: Technical Information SD-12. 1.ed. Hamamatsu City: 2011. 43p. Disponível em: <http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/infrared_techinfo_e.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2015.

HARALICK, Robert M.; SHAPIRO Linda G. **Glossary of computer vision terms**. Pattern Recognition, Great Britain, v. 24, n. 1, p. 69 - 93, 1991.

HWANG, Enoch. **Build a VGA Monitor Controller**. Circuit Cellar Magazine, EUA, v. 172, p. 12 - 17, nov. 2004. Disponível em: <<http://faculty.lasierra.edu/~ehwang/public/mypublications/VGA%20Monitor%20Controller.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 643p.

KREITH, Frank; BOHN, Mark. **Princípios de transferência de calor**. 6.ed. São Paulo: Thomson, 2003. 640p.

MARIMOTO, Carlos E. **Monitores**. 2.ed. Guia do Hardware, 2010. 5p. Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/tutoriais/monitores-1/>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

MELEXIS, MLX90620. **FIRray:16X4 Far InfraRed Array**. 4.ed. Belgium: MLX, 2012. 40p. Disponível em: <<http://www.melexis.com/Infrared-Thermometer-Sensors/Infrared-Thermometer-Sensors/MLX90620-776.aspx>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

MENESES, Paulo Roberto et al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. 1.ed. Brasília: CNPQ, 2012. 276p. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

MERCK, KGaA. **Lcd Explorer**. Darmstadt: MERCK , 2004. Disponível em: <http://cc-special.merck.de/lcd_explorer/licristal/index.html#/en/psvadisplay>. Acesso em: 7 abr. 2015.

MONKMAN, Gareth. **Industrial infrared sensors**. Sensor Review, Bingley, v. 16, n. 15, p. 22 - 25, jun.-set. 1996.

OMNIVISION, Technologies. OV7670. 1.ed. California: OmniVision Inc., 2005. 30p. Disponível em: <<http://www.voti.nl/docs/OV7670.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

PEDRONI, Volnei A. **Digital Electronics and Design with VHDL**. 1.ed. New York: Elsevier, 2008. 679p.

REINMEDICAL, Medical Monitors. **MONITOR RESOLUTIONS**. Mönchengladbach: REIN, 2014. Disponível em: <<http://www.reinmedical.com/en/knowledge-technology/monitor-resolutions-overview.html>>. Acesso em: 4 abr. 2015.

RUDDOCK, Robert Wayne. **Basic Infrared Thermography Principles**. 1.ed. Flórida: Reliabilityweb.com Press, 2010. 97p.

RUSS, John C. **The Image Processing Handbook**. 6.ed. Florida: CRC Press, 2011. 853p.

SERGEANT, Jerry KRUM, Al. **Thermal Management Handbook: For Electronic Assemblies**. 1.ed. New York: McGRAW-HILL, 1998. 650p.

SHABANY, Younes. **Heat Transfer: Thermal Management of Electronics**. 1.ed. London: CRC Press, 2009. 523p.

SNELL, John; STUART, Michael. **Introduction to Thermography Principles**. 1.ed. Illinois: ATP, 2009. 73p. Disponível em:
<http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/9032790_ENG_A_W.PDF>. Acesso em: 7 abr. 2015.

SOLOMON, Cris; BRECKON Toby. **Fundamentos de processamento digital de imagens: uma abordagem prática com exemplos em Matlab**. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 285p.

TEKALP, A. Murat. **Digital video processing**. 1.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 526p.

TOROK, Delfim Luis; CAPPELATTI, Ewerton Artur. **Praticando VHDL**. 1.ed. Novo Hamburgo: FEEVALE, 2011. 113p.

TOROK, Delfim Luiz. **Projeto Visando a Prototipação do Protocolo de Acesso ao Meio de Redes Ethernet**. Porto Alegre: 2001. 118p. Tese (Mestrado em Ciência da Computação) - Faculdade de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2001.

XILINX, Inc.. **Spartan-3E Generation: FPGA User Guide**. 2.ed. New York: Xilinx, 2011. 512p. Disponível em:
<http://www.xilinx.com/support/index.html/content/xilinx/en/supportNav/silicon_devices/fpga/spartan-3e.html>. Acesso em: 7 abr. 2015.

YEH, Lian-Tuu; CHU, Richard C. **Thermal Management of Microelectronic Equipment: Heat Transfer Theory, Analysis Methods, and Design Practices**. 1.ed. New York: ASME Press, 2002. 414p.

APÊNDICES

APÊNDICE A - FILTROS DE BORDAS

```
% Rotina em MATLAB para comparação entre diferentes filtros de bordas
I=imread('Lenna.jpg');    %Ler Imagem
E = imresize(I,[256 256]); %Redimensiona a imagem
B=rgb2gray(E);           %Converte de RGB para tons de cinza
%Máscaras de Roberts
hor_r = [1 0 0; 0 -1 0; 0 0 0];
ver_r = [0 1 0; -1 0 0; 0 0 0];
%Convolução das máscaras com a imagem
c_hor_r = conv2(double(B), hor_r);
c_ver_r = conv2(double(B), ver_r);
c_r=c_hor_r+c_ver_r;
%Máscaras de Prewitt
hor_p = [1 0 -1; 1 0 -1; 1 0 -1];
ver_p = [-1 -1 -1; 0 0 0; 1 1 1];
%Convolução das máscaras com a imagem
c_hor_p = conv2(double(B), hor_p);
c_ver_p = conv2(double(B), ver_p);
c_p=c_hor_p+c_ver_p;
%Máscaras de Sobel
hor_s = [-1 -2 -1; 0 0 0; 1 2 1];
ver_s = [-1 0 1; -2 0 2; -1 0 1];
%Convolução das máscaras com a imagem
c_hor_s = conv2(double(B), hor_s);
c_ver_s = conv2(double(B), ver_s);
c_s=c_hor_s+c_ver_s;
subplot(2,2,1),imshow(B); title('Imagem Original');
subplot(2,2,2),imshow(uint8(255*(c_r/ max(c_r(: ))))); title('Filtro de Bordas de Roberts');
subplot(2,2,3),imshow(uint8(255*(c_p/ max(c_p(: ))))); title('Filtro de Bordas de Prewitt');
subplot(2,2,4),imshow(uint8(255*(c_s/ max(c_s(: ))))); title('Filtro de Bordas de Sobel');
```