



Sensores de Imagem Digitais CCD E CMOS

Jhonata Serra de Souza¹, Jorge Alexander Sosa Cardoza²

¹ Graduando do curso de **Tecnologia em sistemas eletrônicos**. IFAM. 2009 (jhom_bil_serra@hotmail.com).

² Professor Orientador. Doutorado em **Engenharia Mecânica**. Universidade de São Paulo. - Especialização em **Engenharia de Processos Industriais Mecânicos**. UFSC. - Graduação em Engenharia Elétrica. UFAM. - Graduação em Tecnólogo Mecânico. Instituto Tecnológico Centro Americano. (jcardoza@ifam.edu.br).

Resumo: As imagens são importantes em todas as áreas, principalmente no imageamento médico, na geografia, no macro e no micro cosmos. Há tempos atrás nossos bisavós registravam os momentos de suas vidas com as máquinas um pouco antiga, com tecnologia básica, onde era caracterizada por uma câmara, uma chapa de Cobre prateada e polida, onde recebia uma explosão de vapores de Iodo, gravando assim através de reação química do Iodo com o cobre juntamente o feixe de luz, dando assim origem a uma camada de iodeto de prata, que através dos seus contornos davam origem a fotografia. Hoje em dia tanto na década presente quanto à década passada onde tínhamos a tecnologia do filme fotográfico que também não era uma excepcional tecnologia mais já era um grande avanço, e isso com o tempo passamos a ter o privilégio da microeletrônica em nossas mãos. Não se passara muito tempo e hoje temos em nosso poder um tipo de equipamento que faz cálculos de uma matriz, de um processamento de em média 2.368.000 de unidades, em um segundo, sofrendo também com o seu fator de aproveitamento, mostrando a leitura interpolada da imagem de bit a bit, nos sensores apresentados o CCD (*Charged Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). O objetivo deste trabalho é apresentar a descrição do funcionamento básico destes sensores de imagens, a sua invenção e transformação no tempo até hoje, o desempenho de cada um deles e a comparação dos mesmos. Para isto, foi realizada uma revisão bibliográfica dos últimos cinco anos de artigos científicos, teses, dissertações, monografias, livros e sites na internet.

Palavras-chave: fotografia, microeletrônica, sensores CCD, sensores CMOS, sensores de imagens

1. INTRODUÇÃO

No passado e assim como hoje, e com certeza para toda a eternidade, não perderemos a bela ação de fotografar os nossos momentos, sejam eles belos ou ruins, documentar as nossas pesquisas. Esse tipo de ação já está acontecendo há muito tempo, desde o final do século passado já eram marcadas com dispositivos nada convencionais e a sua caracterização de funcionamento baseado na química. Em seguida vieram às câmeras com dispositivos de captura dos filmes fotográficos.

O tempo se passou e a tecnologia evoluiu, destacando-se a revolução digital, onde as economias do custo e do tempo ficam evidentes, e facilmente escolher as fotografias que serão reveladas.

Em 1975 foi inventada a primeira máquina fotográfica digital pelo o engenheiro da empresa Kodak, em seguida foram inventados os dispositivos que mudariam drasticamente a fotografia, na praticidade e na qualidade da imagem, estes dispositivos eletrônicos são os sensores de imagem digital.

Estes dispositivos semicondutores são chamados de CCD e CMOS, a função é capturar a imagem através de seu feixe de luz e transformado em carga de elétrica, onde essa carga é processada em imagem digital pelo circuito eletrônico [5].

Os objetivos deste trabalho é fazer a descrição cronológica da evolução dos sensores de imagem CCD e CMOS, e a comparação do desempenho dos mesmos. Abordando a história significativa, suas características e aplicações, o esquema de funcionamento e os fatores que afetam a qualidade de imagem.

2. SENSORES DE IMAGEM

Os sensores de imagem são dispositivos semicondutores e fabricados através de processos de microeletrônica, conhecido como tecnologia planar, as propriedades de corrente e tensão, são muito



baixas, geram essas cargas quando o feixe de luz que passa pela lente, incide sobre a superfície do sensor, sendo processado por um circuito eletrônico específico e formando assim a imagem digital.

2.1 História dos sensores de imagem

Em meados da década de 70 nos laboratórios de *Bells Labs*, durante várias e várias pesquisas relacionadas a circuitos integrados, novos lasers e semicondutores envolvendo sistema de micro e nano eletrônica, projeto vai e vem e nasce ocasionalmente um sensor de imagem que hoje conhecemos como sensor CCD, nasce de um projeto feito pela mão dos físicos *Willard Boyle* e *George Smith*, que mais adiante em 1973 ganham a medalha de *Franklin Instituts Stuart Ballantine*, justo pela invenção do mesmo. Em 2009 ganharam o prêmio Nobel de física pelo invento do CCD. [5]

Em 1975, por conta da tecnologia do sensor ser uma novidade, foram criadas as primeiras câmeras de TV mais com uso restrito apenas para uso comercial de emissoras de televisão e etc. Em 1979 conseguiram fazer um grande avanço em relação ao sensor CCD, pois de um simples sensor de resolução 100x100px passou a ter 320x512px.

Câmeras Digitais

Em 1975, o engenheiro elétrico *Steve Sasson*, em um de seus laboratórios de pesquisa da *Kodak*, inventou uma revolução em termos de máquinas fotográficas, não sendo bastante discreta mais tendo um caráter digital, a primeira máquina fotográfica digital gravava as imagens em uma fita cassete, tinha como o seu sensor já o revolucionário CCD. O seu único problema era a velocidade de processamento da imagem, era de aproximadamente de 23 segundos para a formação da imagem em preto e branco, com uma escala quadrada de 100x100px, neste equipamento era acoplado a ele um reproduzidor de fita cassete e também a fita onde eram gravadas as imagens interligado à uma televisão que visualizava a fotografia [10].

Em 1976 a *Kodak* a está com a máquina desenvolvida, mais somente no ano de 2001 assumiu publicamente, que “teve em suas mãos a primeira câmera fotográfica digital do mundo”.

Hoje em dia dispomos em nossas mãos câmeras digitais com quase o mesmo mecanismo e princípios básicos de funcionamento de uma máquina de filme fotográfico. Ambas têm como característica o feixe de luz que incide na superfície do coletor, que vem através de uma lente ou também dependente da especificação do equipamento (um conjunto de lentes), estes são os sensores CCD e CMOS, que estão presentes em câmeras fotográficas digitais [10].

A carga elétrica muito baixa que sai de cada terminal do dispositivo representa o feixe de luz que se reduziu a cada píxel, ou seja, a cada pequeno ponto de luz que incide na superfície do sensor e gerando uma pequeníssima carga elétrica, que discretamente chamam de bits [7].

As quantidades de píxeis presentes no sensor formam uma matriz de linhas e colunas de píxeis, é o que determina a resolução da máquina, sendo elas hoje em dia as mais dispersas possíveis, tais são elas: Vídeo Graphics Array (VGA)640x480; Extend Graphics Array (XGA) 1024x768; Quad-Extended Graphics Array (QXGA) 2048x1536; Hyper-Extended Graphics Array (HXGA) 4096x3072.

Vale lembrar também que quanto maior a resolução do sensor, menor a fração de erro e ruído ou perda de nitidez em uma fotografia.

3. SENSOR CCD (*Charged Coupled Device*) E CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*)

Há no mercado nos dias de hoje dois tipos de sensores digitais de grande potência são eles: os CCD (*Charged Coupled Device*) e o CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), que são tipos de dispositivos de estado sólido, são circuitos integrados feitos de silício, que são compostos por vários transistores e diodos amontoados e um mesmo circuito e interligados até mesmo e um mesmo píxeis do chip, que geram pequenas cargas elétricas quando a luz incide sobre a superfície do componente. Existe também uma forma diferente de funcionamento de cada um dos dois em relação à transformação da energia luminosa em energia elétrica quando a luz incide sobre o dispositivo.

Para simplificar o funcionamento de um sensor podemos representar como sendo uma matriz que pode ser quadrada ou retangular, que se faz a amostragem de uma imagem bidimensional

em duas direções ortogonais x e y , que geram uma matriz matemática de M e N , podemos falar que M é o número de colunas e N o número de linhas.

Onde a interseção das duas variáveis M e N gera uma determinada equação matemática, ou até um número que pode ser um número inteiro ou até mesmo fracionário, que é interpretado e processado pelo sistema lógico da máquina e transmitido para a tela de LCD, onde vemos uma imagem colorida cheia de seus detalhes e características, mais por dentro do aparelho é uma matriz matemática com apenas milhões de números e cálculos dispersos. Ou seja, uma máquina com uma resolução VGA tem em sua composição de uma matriz matemática de 307200 unidades de números calculados, e ir até 12582912 da resolução HXGA.

Em 1990 o CMOS teve um grande avanço em torno de seu concorrente que o CCD, que estavam presente em todas as máquinas fotográficas, já tava perdendo o seu lugar no pódio para o CMOS que apresentava muito mais vantagens que ele, uma de suas vantagens é o baixo consumo de energia, redução do tamanho do sistema de imageamento [6].

O sensor CCD recebeu justo esse nome pela forma que a carga é transferida ao amplificador integrado na saída do dispositivo, depois da luz exposta a sua superfície, ou seja, o sensor CCD faz o trabalho de deslocar os elétrons para o amplificador, que logo após passa para o conversor analógico para o digital. [10]

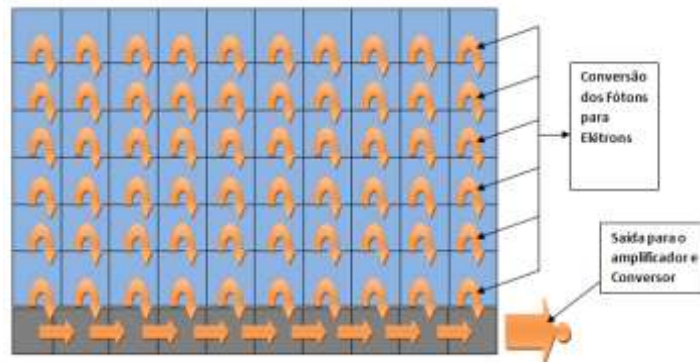


Figura 3.1 - Esquema de Transferência dos fótons para serem convertidas no sensor CCD.

Um sensor CMOS é constituído de uma matriz de micros diodos fotossensível, ou seja, um n (nano) diodo em cada célula que chamamos eletronicamente de píxel, o sensor CMOS é um tipo de dispositivo que tem uma capacidade muito grande, pois em cada célula da matriz é contido dentro a ela um circuito integrado individual interligado aos outros circuitos, que é uma formação totalmente diferente do CCD [1].

3.1 Sensor CCD (*Charged Coupled Device*)

O sensor tem características de funcionamento semelhante aos painéis de captação da energia solar para transformação em energia elétrica, onde a luz solar incide na superfície da placa de captação, a energia do sol é absorvida pelas células da placa e depois é passada por um meio de coleta, que transforma toda a energia térmica em energia elétrica.

O funcionamento do sensor CCD também tem suas possíveis semelhanças, tendo como o seu princípio fundamental de funcionamento as células que são sensíveis à luz, que também podemos chamar de píxel, que é também capaz de gerar energia elétrica através da captação incidente na superfície do sensor do píxel, o dado dependente dos milhares de sensores a milhões de células fotossensíveis [5].

Os pixels têm como característica padrão de organização uma matriz composta por linhas e colunas, o píxel é formado pela interseção da linha pela coluna. Os sensores CCD são fabricados com a tecnologia MOS (Metal-Oxide Semiconductor), isso se caracteriza por cada píxel ser um circuito eletrônico nele, e esse circuito contido em cada píxel pode ser considerado um capacitor MOS que converte os fótons em cargas elétricas que logo após é lida e processada posteriormente, Como pode ser apreciado na figura 3.2.

Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor

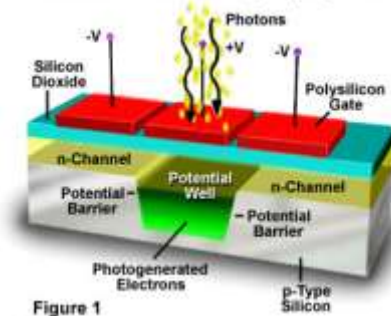


Figure 1
Figura 3.2 - Capacitor MOS (fonte: <http://micro.magnet.fsu.edu>) [2].

Para que possamos obter equações em meio ao capacitor MOS, pode-se utilizar a equação 3.1 que representa a Energia potencial do capacitor.

$$EP = -|q| * \Psi \quad \text{Equação 3.1 [5]}$$

Onde: q e a densidade de carga e o Ψ e o potencial eletrostático.

Matriz de Píxeis do Sensor CCD

Os dispositivos CCD são caracterizados com relação à função de seu mecanismo de transferência de dados, o mecanismo trabalha com quadros (frames), estes são divididos em quatro categorias [5]: Full Frame: Transferência do quadro completa; Frame Transfer: Transferência de quadro; Split Frame Transfer: Transferência parcial de quadro; Interline Transfer: Transferência entre linhas.

O sensor CCD é um tipo de dispositivo que pode-se acoplar e fazer uma integração de circuitos junto a ele para processar cargas de uma matriz de píxeis em único substrato, e pode ser apreciado na figura 3.3.

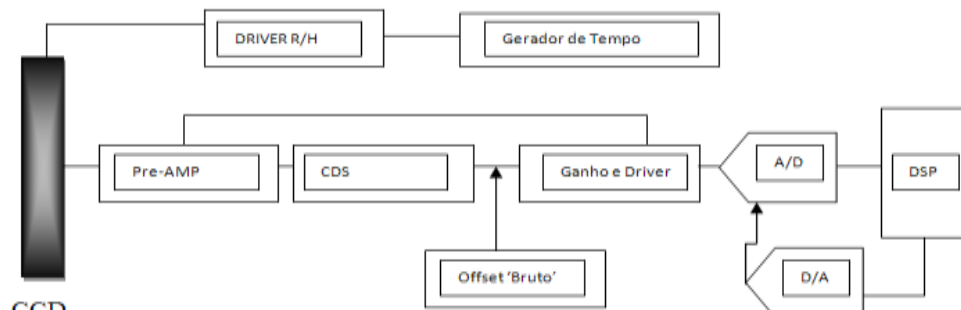


Figura 3.3 - Diagrama de blocos de circuitos acoplados ao CCD. [5]

3.2 Sensores CMOS (Complementary Metal Oxide Semicondutor)

O Sensor CMOS foi criado por Erick R. Fossum, que teve como base o sensor CCD para a sua invenção em meados do final da década de 80 para o início da década de 90.

O CMOS apresenta a mesma propriedade de captura de imagem, as únicas diferenças que se apresenta perante os dois é a forma no qual ele transforma a energia da luz para cargas elétricas e também em relação como e composto cada circuito de um píxel. Os sensores CMOS têm a mesma capacidade de gerar uma carga elétrica proporcional à intensidade luz que incide na superfície do sensor.

Os sensores CMOS têm em cada píxel um circuito constituído de fotodiodos, capacitores e transistores interligados e formando assim o píxel individual, nesse sensor também há a possibilidade de selecionar as linhas e colunas na matriz sensorial, ou também fazer a interseção entre eles, ou seja, selecionar apenas um píxel designado fazendo a interseção da linha com a coluna ou também acessar apenas uma área dentro de uma imagem. [5]

O CMOS é dividido em duas categorias de sensores de imagem que são eles: Sensores de Píxel Passivos; Sensores de Píxel Ativos.

Sensor de Píxel Passivo (PPS)

Em 1967, um dos estudos de Mr. Gene P. Weckler foi à relação ao píxel passivo da matriz PPS, onde cada píxel consiste em um elemento fotossensível, que consiste em um fotodiodo e um transistor, como pode ser apreciado na Figura 3.3.

O funcionamento do PPS pode ser simplificado dá seguinte forma: o transistor tem como principal característica de chaveamento, que faz a transferência do sinal do píxel para o amplificador de integração de carga. Os sensores PPS também têm a característica de memória dinâmica chamado de “DRAMs”, que é um tipo de memória RAM de acesso direto e ele armazena cada sinal recebido em um capacitor. O sinal que é recebido pelo amplificador de saída em cada coluna um por um em sua seqüência onde é transmitido apenas para um único amplificador. [3]

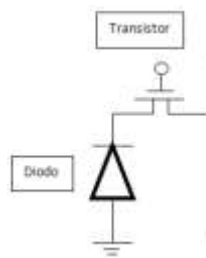


Figura 3.3 - Diagrama de blocos de circuitos acoplados ao CCD.

Sensor de Píxel Ativo (APS)

O Sensor de píxel ativo tem como principal característica possuir um amplificador. O sensor APS é composto de uma matriz de circuitos lógicos que fazem a seleção das linhas e das colunas da matriz sensorial, circuitos amplificadores de saída, conversores A/D e um circuito de sincronização e controle, fora esses citados posteriormente podem se acoplar mais circuitos ao sensor, isso depende da aplicação no qual se deseja utilizar.

O píxel de APS é composto de fotodiodo e de um circuito isolante, onde se faz a conexão elétrica entre o sinal do píxel e o circuito de saída, entre várias estruturas presente dentre as células do APS, os tipos de dispositivos mais empregados em seus píxeis são os fotodiodos e píxel ativo com o fotogate.

Os píxeis onde são presentes os fotodiodos além também dos transistores são seguidos das fontes que são ligados ao mesmo fotodiodo, nesse conjunto de dispositivos interligados entre si, ainda se faz presente dois tipos de transistores onde um tem como função o “reset” que inicializa o píxel no qual se faz presente e outra que faz a seleção de célula que conecta ao barramento [9].

Em 1987 começaram a serem desenvolvidos os primeiros sensores CMOS com APS.

3.3 Comparações dos Sensores.

A seguir é feita a comparação do sensor CCD e do CMOS, referente às seguintes variáveis: consumo de potência; velocidade; fornecimento de tensão; fill factor; custo de fabricação; sensibilidade e radiação [5]:

Consumo de potência: Tanto os sensores CCD e quanto CMOS, em relação a consumo de potência é dado de acordo com suas características especificam de cada dispositivo. Hoje o sensor que consome menos energia e o CMOS por ser um dispositivo de substrato único, ou seja, não se precisa acoplar nenhum tipo de circuito adicional, quanto que o CCD necessita de vários circuitos que o auxiliem para o seu suporte de funcionamento;

Velocidade: O CMOS processa cerca de 1 Gigapíxel por segundo isso tudo graças a arquiteturas paralelas e a integração de várias funções em um único circuito, reduzindo a capacitância indutâncias e atrasos de propagação, tornando-o mais rápido;

Fornecimento de Tensão: O CCD também sai à frente, onde é preciso diversos fornecedores de tensão para a transferência da carga de píxel a píxel. E o CMOS necessita apenas de um fornecimento total;



Fill Factor: O CMOS tem seu fator de aproveitamento de preenchimento em cerca de 50 a 70%, dando assim uma boa qualidade à foto mais não sendo superado pelo CCD que já ultrapassa dando assim em 80%;

Custo de Fabricação: Enquanto os CCD têm um custo caro em torno de sua fabricação, devido o seu processo de fabricação ser um pouco delicado, já os CMOS eles têm um padrão de produção de mesma linha dos Circuitos integrados existentes barateando seu custo;

Sensibilidade: O tempo de integração é um fator onde é necessário um pouco para os sensores CCD, pois tem grande sensibilidade. Ao contrário dos sensores CMOS que por causa da luz incidente em áreas de menores dimensões, tem a sua sensibilidade reduzida;

Tolerância a Radiação: Os sensores CMOS existem tipos de tecnologias aonde podem ser implementados ao sensor para combater a resistência a radiação. Sendo ao contrario dos CCD que são necessários tipos de blindagem do sensor para que não ocorra o efeito de radiação sobre ele.

4. EVOLUÇÃO E COMPARAÇÃO DOS SENSORES.

4.1 Evolução Cronológica dos Sensores de Imagem.

A evolução dos sensores de imagens apresentado na tabela 1 é referenciada desde 1967 até 2012, mostra a evolução das tecnologias, iniciando pixel passivo, capacitivo, fotodiodo, capacitor MOS, lentes, CCD, APS e CMOS. Também é apresentado a descrição do evento, o ano, lugar, autor, tecnologia e principal característica. Constata-se a fabricação da primeira câmera digital em 1975, pela empresa Kodak. Neste ano 2012, a empresa Sony lançou o sensor CEMOS que atinge uma velocidade de 34,8GB/s.

Tabela 1 Eventos significativos dos sensores de imagem de 1967 até 2012.

Descrição	Ano	Lugar	Autor	Tecnologia	Característica
(1) Estudo sobre o PPS	1967	Fairchild Semiconductor	Mr. Gene P. Weckler	Píxel Passivo	Cada pixel é um fotodiodo e um transistor.
(2) Criado primeiro CCD	1969	Bells Labs	Willard Boyle e George Smith	Capacitiva	Soldado manualmente.
(3) Produzidos os CMOS	1974	U.S.A	Fairchild Electronics	Fotodiodos	Produção apenas comercial
(4) Produção dos CCD	1974	U.S.A	Fairchild Electronics	Capacitor MOS	Resolução 100x100px.
(5) Primeira câmera digital	1975	Eastman Kodak Company	Steve Sasson	Lente de câmera super8	Baixa velocidade.
(6) Uso astronômico	1975	Planeta Urano	NASA	CCD	Primeira fotografia da astronomia.
(7) Primeira máquina com CCD	1976	U.S.A	Sony	CCD	Primeira máquina com o CCD.
(8) Retina de silicone	1989	U.S.A	C. Mead	CMOS	Amplificadores dentro do píxel e retina de silicone.
(9) Comercialização APS	1995	U.S.A	Photobit Corp	APS	Tecnologia APS para uma série de aplicações.
(10) nova geração de sensor CMOS	2012	U.S.A	Sony	CMOS	Atinge velocidade de 34,8 GB/S



4.2 Tabela comparativa entre os sensores CCD e CMOS.

Variáveis	CCD (Charged Coupled Device)	CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
(1) Ano de Invenção.	1969	1990
(2) Criadores.	Willard Boyle e George Smith	Eric R. Fossum
(3) Tamanho Píxel.	2.3 µm	1,3µm
(4) Resolução.	25 Mpx	25 Mpx
(5) Componente do Circuito.	Capacitor MOS	Foto-Diodo, capacitor, transistor
(6) Aplicações	Câmeras estáticas de alta resolução e filmadoras de alta qualidade	Câmeras de modos múltiplos, 3-D e imageamento com alta faixa dinâmica
(7) Fill Factor	80%	50 a 70%
(8) Consumo de energia	Consumem cerca de 100x mais que o CMOS por não ter um sistema dinâmico de transferência de carga.	É um tipo de sensor onde no qual tem um sistema de transferência de carga mais simples e dinâmico acarretando um baixo consumo.
(9) Velocidade	6,7 GB/S	34,8 GB/S novo Modelo da Sony, 2012
(10) Custo de Fabricação.	O CCD custa em média 2x mais que o CMOS	Os sensores CMOS hoje têm sua produção mais do que barateado em questão que são produzidos quase 90% a mesmo padrão que os CI's Existentes.
(11) Qualidade e Ruído	Criam imagens de alta qualidade e baixo nível de ruído.	Geralmente são mais suscetíveis a ruídos (interferência eletromagnética).

5. CONCLUSÃO

O funcionamento do CCD é caracterizado por um circuito eletrônico que usa capacitores como sensores, a matriz da imagem é amplificada, processada e transmitida parcial ou completamente. Apresenta melhor desempenho no fill factor, nas imagens de alta qualidade e no baixo nível de ruído.

Já no CMOS o sensor eletrônico é baseado em fotodiodo e transistores, mais eficiente e rápido, a matriz da imagem esta em forma digital e é transmitida de forma completa. O melhor desempenho é nas seguintes variáveis: sensor mais eficiente e rápido; área do pixel menor; baixo consumo; custo menor. Tem a desvantagem da sensibilidade ao ruído e a interferência magnética. Bastante aplicado no imageamento médico e sua velocidade está em torno de 34,8 GB/s no novo modelo da Sony.

REFERÊNCIAS

[1] Boechat, J. Albuquerque, A. “**Efeitos Visuais, uma Abordagem a Partir do Processamento Digital de Imagens**” Volume XVI. 2009. 27pgs. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas gerais, 2009.

[2] Banco de dados de imagens Gstatic disponível em: http://t1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRX2LwQw9V_kWyaRFKA4SMJzCQ-C9uG7ArHTCyQHKeFBB5SaKHYI0DlsVm2w, Acessado em 21 de junho de 2012.

[3] Capacitor Mos – Molecular Expressions: Images from the microscope – disponível em: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/images/moscapacitorfigure1.jpg>, acessado em 23 de Junho de 2012.



- [4] Ferreira, M. “**Projeto E Caracterização De Imageadores Aps Resistentes À Radiação**” 2007. 137pgs. Dissertação (Mestrado Em Ciências Em Engenharia Elétrica) - Coordenação Dos Programas De Pós-Graduação De Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] Goretti, K. “**Estruturas APS Resistentes à Radiação para Aplicações Espaciais**” 2006. 118pgs. Dissertação (Mestrado em Ciências Em Engenharia Elétrica) - Corpo Docente Da Coordenação Dos Programas De Pós-Graduação De Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [6] Lemos, H. “**Projeto De Circuitos Para Compressão De Imagens No Plano Focal De Câmeras CMOS**” 2012. 108pgs. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- [7] Lunardi, D. “**Openmocap: Uma Aplicação de Código Livre Para a Captura Óptica de Movimento**” 2009. 91pgs. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Ciências Exatas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [8] Manuel, J. “**Sensores de Imagem – Sistemas sensoriais**” 2005. 27pgs. Departamento de Engenharia Eletrotécnica - DEE/FCT/UNL. Universidade nova de Lisboa, quinta da Torre – Portugal, 2005.
- [9] Moreira, L.; Mestanza, S.; Silva, I.; Queiroz, J.; Noiye, W.; e Swart, J. “**Sensor de Píxel ativo no Processo CMOS de 0,35µm**” 2003. 7pgs. Centro de Componentes semicondutores, Laboratório de sistemas integráveis. CCS/FEEC- Unicamp, LSI-EPUSP. São Paulo, 2003.
- [10] Marice, E. “**Montagem Experimental Para Caracterização de Câmeras Digitais**” 2011. 146pgs. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- [11] Maciel, A. “**Análise e projeto de um sensor de imagem de 0.35 µm CMOS para compressão do plano focal de câmeras digitais**” 2009. 111pgs. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [12] Tabet, M. “**Double Sampling Techniques for CMOS Image Sensors**” 2002. 355pgs. Tese (Doutorado em Philosophy in Electrical and Computer Engineering) - University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada, 2002.