



Agord de Matos Pinto Júnior

**Oscilador Controlado por Tensão (VCO) com
configuração em Anel, com técnicas de
Mitigação para aumentar o grau de resistência à
Radiação Ionizante**

Campinas-SP

2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Agord de Matos Pinto Júnior

**Oscilador Controlado por Tensão (VCO) com
configuração em Anel, com técnicas de Mitigação para
aumentar o grau de resistência à Radiação Ionizante**

Monografia de Qualificação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Yuzo Iano

Este exemplar corresponde à versão da qualificação defendida pelo aluno Agord de Matos Pinto Júnior, e orientada pelo Prof. Dr. Yuzo Iano

Campinas-SP

2017

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Motivação do Trabalho	2
1.3	Objetivo do Trabalho	3
1.4	Resultados Esperados	5
1.5	Divisão do Trabalho	5
2	Tecnologia	6
2.1	DARE - <i>Design Against Radiation Effects</i>	6
3	Radiação Ionizante	8
3.1	Cinturão de Radiação (Van Allen)	8
3.2	Raios Cósmicos Galácticos (RCG)	8
3.3	Partículas Solares	9
3.4	Efeitos da Radiação em Dispositivos CMOS	9
3.4.1	Eventos Cumulativos (Permanentes)	10
3.4.1.1	Danos por Deslocamento	10
3.4.1.2	Efeitos de Dose Total Ionizante	10
3.4.2	Efeitos de Eventos Singulares (SEE)	11
4	Estratégias de Mitigação	12
4.1	Técnicas em nível de dispositivo	12
4.2	Técnicas em nível de circuito	13
4.3	Técnicas em nível de Sistema	13
5	Oscilator Controlado por Tensão (VCO)	14
6	Cronograma de Atividade	16
7	Resultados Parciais	17
	Referências	21

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Os sistemas de telecomunicações ao longo das últimas décadas estão em fase de enorme transformação e expansão. A comunicação está presente exponencialmente no cotidiano, apresentando-se em várias frentes, as quais pela comodidade já se tornaram indispensáveis: rádio, televisores, telefonia móvel, a grande rede (internet), entre outras formas. Já se tornaram indispensáveis ao desenvolvimento de novos tipos de serviços.

Dentro desse contexto evolutivo tecnológico, a microeletrônica passou a ter papel crucial, com o advento dos circuitos integrados. E com um destaque principal, a estrutura MOS (Metal-Óxido-Semicondutor) tem sido a força motriz mais importante para a evolução de quase todos os tipos de tecnologias nas últimas décadas. Por conseguinte, CIs (Circuitos Integrados) encontram-se presentes praticamente em quase todos os artefatos produzidos pela indústria eletroeletrônica, assim acontecendo também com a tecnologia da indústria aero-espacial, onde para cada foguete ou satélite lançado ao espaço, um novo aparato tecnológico é adicionado.

Nos dias atuais, as comunicações por satélite ganharam uma posição de destaque, devido seu uso em serviços de: localização, navegação, radar, sistemas meteorológicos e telecomunicações. O satélite passou a ser também o mais importante meio de transmissão, visto que é pela vasta rede de satélites de comunicação que fluem informações, dados, conhecimentos, mensagens, notícias, e imagens que vão de um lado ao outro do mundo em poucos minutos, interligando assim diferentes pontos do planeta [1].

O uso de satélites de comunicação vem se mostrando uma alternativa muito vantajosa, pois esta tecnologia demonstra várias vantagens em relação aos meios alternativos de comunicação terrestre, como por exemplo, enlace de micro-ondas, cabos elétricos, fibras ópticas, entre outros. Porém, vale ressaltar que a vantagem, mais significativa é: a possibilidade de atender a um elevado número de usuários, independente da distância entre eles, sem que isso seja custoso e no que diz respeito à grande largura de banda disponível [2].

Independente do processo de comunicação que estiver sendo analisado, há três elementos básicos: transmissor, canal e receptor. Entretanto, à medida que o sinal transmitido se propaga ao longo do canal, ele é distorcido devido a imperfeições do canal. Além do mais, ruídos, sinais interferentes (que se originam de outras fontes),

são acrescentados à saída do canal, resultando no sinal recebido, o qual é uma versão corrompida do sinal transmitido [3]. Além das avarias mencionadas, imperfeições apresentadas pelo transistor acarretam em sua operação efeitos físicos que alteram seu comportamento e dificultam o projeto de sistemas em hardware. A evolução de qualquer proposta na área espacial deve-se considerar os efeitos recorrentes do transistor, assim como outros eventos que a contínua ação da radiação provoca nos materiais e componentes.

Com objetivo de reverter esses efeitos, investiu-se muito nos últimos anos em processos, tecnologias e técnicas alternativas de projeto, com intuito de melhorar o resultado final. Haja vista que com a evolução dos dispositivos MOS, a qual resultou em uma alta escala em termos de nível de integração, sendo que as dimensões dos dispositivos MOS foram reduzidas drasticamente e com a obrigação de diminuir a potência dissipada, acabou que os circuitos integrados ficaram mais passíveis de falhas, além de aumentar a variabilidade do processo de produção, o que pode acarretar circuitos operando fora da sua faixa de especificação [4]. Outros efeitos paralelos ao da miniaturização devem ser adicionalmente considerados como: o efeito de canal curto (*SCE – Short Channel Effect*), a degradação da mobilidade dos portadores móveis do canal (elétrons ou lacunas) e o estresse induzido por corrente de fuga (*Stress-Induced Leakage Current*) [5], juntamente com uma maior vulnerabilidade a falhas transientes ocasionadas por incidência da radiação [6] em sistemas aeroespaciais.

Destarte, em aplicações em ambientes que sofrem com radiação, os dispositivos inerentes em um circuito devem ter um certo grau de robustez, em nível de dispositivo, topologia de circuito e leiaute. Desta forma, o projeto de circuitos integrados analógicos representa uma tarefa extremamente complexa devido ao grande número de variáveis de entrada a serem determinadas simultaneamente com o intuito de atender as inúmeras especificações de um projeto final. Sendo assim, a evolução tecnológica envolve uma busca constante por um processo robusto com centenas de milhares de transistores (*VLSI - Very Large Scale Integrated*) no mesmo *chip*.

1.2 Motivação do Trabalho

A tecnologia de componentes eletrônicos resistentes à radiação é utilizada na área espacial, como por exemplo, em satélites e sondas, na área de defesa (motores nucleares), na área médica (tratamento oncológico) e na pesquisa em Física. Porém, por ser considerada estratégica, os países dela detentores não a disponibilizam e normalmente criam embargos quando outros países dela necessitam para seus projetos tecnológicos [7]. Tais tecnologias são consideradas sensíveis no âmbito do ITAR (*International Traffic in Arms Regulations*), departamento de Estado responsável pela exporta-

ção e importação temporária de artigos e serviços de defesa.

Com a necessidade iminente da criação no Brasil de uma infra-estrutura para o ciclo completo no processo de fabricação de circuitos integrados, afim de ter uma tecnologia espacial autônoma, e conseqüentemente um programa de defesa da soberania nacional, surge para superar este entrave o projeto CITAR (Circuitos Integrados Tolerantes à Radiações) [7] [8], o qual conta com financiamento da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP e será executado em um esforço de cooperação entre o CTI Renato Archer e outras instituições de pesquisa e ensino: o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Agência Espacial Brasileira (AEB), o Instituto de Física da USP (IFUSP) e o Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Trata-se da primeira ação multi-institucional brasileira para o desenvolvimento de circuitos integrados tolerantes à radiação, destinados a aplicações em satélites científicos, que visa a consolidar no Brasil a competência para a realização do ciclo completo de desenvolvimento de Circuitos Integrados tolerantes a radiações.

Inserido neste projeto de capacitação de instituições nacionais, este trabalho tem como tema a criação de um VCO (*Voltage Controlled Oscillator* – Oscilador Controlado por Tensão), com configuração em *anel* (*Ring Oscillator*), que faz uso de técnicas de mitigação para robustez à radiação.

1.3 Objetivo do Trabalho

Sistemas baseados em (*Phase-Locked Loop* – PLL), ou também conhecidos em português como Malha Travada em Fase são amplamente utilizados como multiplicadores de frequência para a geração de sinais de sincronismo em alta frequência. Os quais podem gerar uma frequência desejada com precisão a qual é um múltiplo de um cristal (referência). Muitos processadores de sinal digital (DSPs) e micro-controladores de alto desempenho fazem uso de PLLs como seu circuito interno de geração de *Clock* em circuitos integrados.

A arquitetura de um PLL para seu perfeito funcionamento depende de estruturas básicas. Representada na figura 1, composta por:

- Detector de Fase e Frequência (*Phase Frequency Detector* - PFD): Compara a diferença de fase e frequência entre ambos os sinais e produzir um sinal de saída proporcional a esta diferença;
- Charge Pump: Manipula a quantidade de carga dos capacitores do filtro; É um conversor da diferença de fase e frequência em corrente, converte o pulso de erro digital em um sinal analógico.

- Filtro (*Loop Filter*): Geralmente é um filtro Passa-Baixa, suaviza o sinal do PFD para gerar a tensão de estímulo do VCO;
- Oscilador Controlado Por Tensão (*Voltage-Controlled Oscillator - VCO*): É o componente que produz a frequência necessária na saída do PLL. Este oscilador faz uso de uma topologia em anel, não possui indutores, capacitores ou resistores, sendo somente composto por transistores;
- Divisor de Frequência Programável (*Loop Divider*): Faz parte do elo de realimentação do PLL, e a sua função básica é reduzir a frequência do VCO dentro de uma faixa de valores que podem ser comparadas com o sinal de referência.

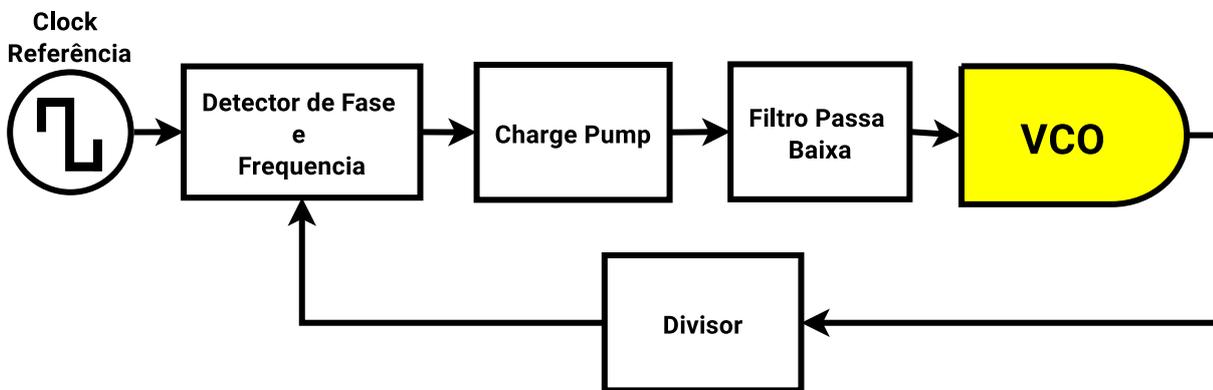


Figura 1 – Phase Locked Loop

Dentro deste cenário, este trabalho tem como objetivo principal o projeto de um Oscilador Controlado por Tensão, com estabilidade elevada no ambiente de radiação, onde dispositivos semicondutores apresentam características indesejáveis. Afim de minimizar os efeitos da mesma e atingir uma elevada estabilidade, técnicas especiais de projetos são necessários para *endurecer* o circuito. Tais técnicas são implementadas em nível de dispositivo (geometria e dimensionamento) fazendo uso da tecnologia robusta à radiação (DARE - *Design Against Radiation Effects*), topologia de bloco, arquitetura de sistema e implementação física (leiaute). O projeto inclui ainda métricas de desempenho e uma descrição mais detalhada linear e não-linear a respeito do VCO.

Este VCO está inserido dentro de um sistema PLL, o qual requer uma velocidade de amostragem muito específica e tem como finalidade principal gerar o *Clock* de um sistema digital (baseado no protocolo *SpaceWire*) [9] [10]. Dentro do contexto do projeto, este protocolo será aplicado para a construção de uma rede de comunicação projetada, por exemplo, para conectar sensores com alta taxa de processamento de dados, unidades de processamento, dispositivos de memória e subsistemas de telemetria e telecomando a bordo de naves espaciais ou de satélites.

1.4 Resultados Esperados

O primeiro resultado será fornecer um VCO que atenda a faixa de 100MHz à 650MHz, com uma frequência central em 200MHz, por seguinte o mesmo esteja com um grau elevado de robustez a efeitos da radiação ionizante.

1.5 Divisão do Trabalho

Esta dissertação será dividida em diversos capítulos afim de uma melhor compreensão e organização. Cada capítulo tem sua relevância *sui generis* para o corrente trabalho. O primeiro dispõe desta introdução, que tem como propósito inserir o trabalho num assente contexto e assinalar os assuntos relacionados ao mesmo que serão abordados à posteriori.

Na sequência, no capítulo 2, fará uma breve descrição histórica sobre a evolução do transistor, a importância da lei de Moore na evolução dos circuitos integrados. Descreve-se sobre a tecnologia CMOS, estudando as suas características mais importantes, assim como também da nano-tecnologia e da tecnologia robusta (*DARE Design Against Radiation Effects*).

O capítulo 3, será dedicado aos efeitos da Radiação em Semicondutores e Dispositivos CMOS, descrevendo os fatores que influenciam na sua propagação. No capítulo 4, será apresentada algumas técnicas de mitigação afim de fornecer uma robustez à radiação, a nível de dispositivo, a nível de circuito e sistema. No capítulo 5, será realizada uma explanação detalhada sobre osciladores, com o intuito de fornecer subsídios teóricos para projetar e desenvolver o oscilador controlado por tensão com configuração em anel, proposto na presente dissertação. No capítulo 6, trata-se da descrição completa do projeto do protótipo, acompanhada de esquemáticos, diagramas e layouts, demonstrando a operação do bloco. São expostos, também, neste capítulo, as simulações realizadas para verificação do funcionamento deste bloco.

2 Tecnologia

Com o passar dos anos, a tecnologia CMOS se desenvolveu muito, e a preocupação em obter dispositivos com uma maior velocidade de chaveamento e baixo consumo de potência fez com que os dispositivos diminuíssem suas dimensões. À medida que as dimensões são reduzidas, fenômenos antes desprezados começam a ser relevantes, influenciando no comportamento do dispositivo, como efeitos de canal curto e canal estreito. A integração de objetos cada vez menores, acoplado com um aumento em o seu número, leva ao aparecimento de algumas variações nas características elétricas de dispositivos MOS, conseqüentemente afetando o desempenho e rendimento dos dispositivos.

Quando a escala e os limites físicos tornam-se os problemas recorrentes, a solução pode estar em novos materiais e estruturas não-convencionais de projeto. Um projetista deve estar ciente do pior caso que possa existir antes do projeto ser implementado no silício. Diante de tais proposições implementa-se técnicas para reduzir o vazamento (corrente de fuga), não só fugas precisa-se poder estimar, é crucial saber os limites de dissipação de energia estática de um projeto, também é vital para um possível chip final ter sucesso no mercado, e esta atenção deve ser redobrada quando usa-se em projeto espaciais, onde além das condições expressas acima, ocorre a variante radiação.

2.1 DARE - *Design Against Radiation Effects*

Dispositivos semicondutores de tecnologias de baixas escalas (micro e nano) são sensíveis aos efeitos da radiação em ambientes hostis como o espaço. Várias abordagens têm sido tomadas para tornar estes dispositivos imunes à radiação.

A biblioteca DARE foi desenvolvida para ser usada em combinação com a tecnologias comerciais, e procura a independência, não limitando-se a *foundrys*, para atuar em ambientes de extrema radiação e ambientes agressivos, tendo como objetivo fornecer uma plataforma de tecnologia analógica e digital em microeletrônica capaz de atuar nesses ambientes. Os elementos da biblioteca DARE (UMC 180nm) estão sendo melhorados constantemente, e novos elementos são adicionados para aumentar a maturidade a um nível adequado.

Para diminuir as perdas devido aos efeitos e aumentar a tolerância à radiação, criou-se desenhos típicos de transistores de geometria de gate fechado (ELT - *Enclosed Layout Transistor*), também conhecidos como transistores sem margens.

ELT é uma técnica de leiaute adequado que pode reduzir os impactos dos efeitos de radiação, tanto em circuitos analógicos, quanto em circuitos digitais, quando comparados aos transistores retangulares (leiaute aberto). Devido à inexistência de bicos de pássaros nas estruturas ELTs e diminuição da corrente de fuga induzida por radiação (o aprisionamento de cargas nos óxidos de isolamento e na interface do SiO_2/Si pode induzir a inversões no canal, ou até mesmo canais parasitas em um transistor ou entre transistores, ocasionando fuga de corrente). Efeito recorrente nas tecnologias produzidas com processo do tipo LOCOS, a qual utiliza isolamento STI.

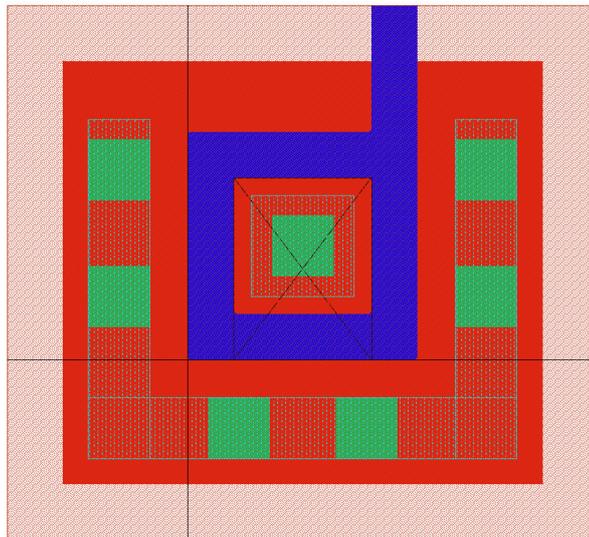


Figura 2 – Transistor ELT Tecnologia UMC 180nm

ELT é bem eficaz para reduzir a degradação elétrica causada por radiação ionizante em transistores, principalmente efeitos ocasionados por efeitos de Dose Total Ionizante. Onde esta técnica envolve um dos terminais pelo poli-silício da porta (*gate*), dessa forma se elimina as regiões ativas que encontram-se entre dreno (*drain*) e fonte (*source*). Não há óxido em contato com os terminais de dreno (*drain*) e fonte (*source*) por onde possa criar um canal parasitário (acúmulo de cargas), evitando o aumento de caminhos de corrente de fuga induzida por radiação, outras vantagens inerentes é possuir em um baixo consumo de energia, alto desempenho, alta produtividade, curtos tempo de resposta, e por último mas não menos importante, de baixo custo quando expostos em ambientes hostis em relação ao MOSFET padrão.

3 Radiação Ionizante

O ambiente de radiação é particularmente volátil e perigoso para dispositivos que nela estão expostos. Dependendo do tipo e intensidade, radiação degrada componentes ao longo do tempo ou pode causar um término rápido e súbito a sua vida útil devido à um defeito na sua eletrônica. A radiação é composta por partículas energéticas e fótons, e tem a capacidade de passar através de materiais, afetando não apenas as camadas externas dos objetos mas também as camadas internas. No espaço, três fontes que ocorrem naturalmente de radiação são responsáveis por danos: o cinturão de radiação (cinturão de Van Allen), raios cósmicos galácticos, e eventos de partículas solares.

3.1 Cinturão de Radiação (Van Allen)

Os cinturões são compostos por: prótons e elétrons energéticos presos pelo campo magnético da Terra. O cinturão de Van Allen é composto de duas faixas, sendo que a interior se situa entre 2200 e 5000 km, e a exterior entre 13000 e 55000 km da superfície da Terra. Não existe uma delimitação entre os dois cinturões; eles se fundem em altitudes variáveis [11]. Durante os períodos de intensa atividade solar, grande parte das partículas eletricamente carregadas vindas do Sol consegue romper a barreira formada pelos cinturões de radiação de Van Allen, que ao atingir a alta atmosfera produzem os fenômenos das auroras polares e das tempestades magnéticas. Na Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS, a região de radiação do cinturão de Van Allen mais interno se aproxima em maior intensidade da superfície terrestre. A consequência é que a intensidade da radiação que penetra nessa região intensifica-se. O cinturão, ao se aproximar da superfície da Terra, reduz a espessura da camada de proteção (blindagem), do Planeta. O reduzido isolamento proporcionado pelo cinturão na região da AMAS facilita a penetração de partículas carregadas [12] [13].

3.2 Raios Cósmicos Galácticos (RCG)

São partículas de alta energia que se originam fora do sistema solar. Estas são núcleos atômicos em sua maioria sem elétrons que ficam aprisionados na esfera magnética. Eles estão presentes em taxas mais elevadas durante a energia solar, taxas mínimas e inferiores durante máximo solar [14]. O seu comportamento é mais difícil de se prever e seu de Dose Total Ionizante (TID) não é geralmente muito elevado devido à improbabilidade de ser atingido em grande escala, mas o seu maior efeito sobre a

eletrônica é causar Efeitos de Eventos Singulares (SEE), que serão explicadas em uma seção subsequente [15].

3.3 Partículas Solares

São resultado da atividade solar. O Sol lança periodicamente partículas, principalmente prótons, em ejeções de massa coronais (CME) e erupções (labaredas) solares. Durante estes eventos, as partículas causam um aumento na densidade do fluxo de partículas energéticas ao longo do sistema solar. Eventos de CME são difíceis de prever, e podem durar desde algumas horas a algumas semanas. As labaredas solares (erupções solares) são o flash de luz que muitas vezes acompanham a CME e podem acelerar partículas em direção à Terra. Eles duram alguns minutos a algumas horas. Quando ocorrem grandes explosões solares, as partículas emitidas chegam à Terra e contribuem para o aumento da dose devida à radiação cósmica. Esses eventos, denominados Eventos de Partículas Solares ou Solar Particle Events (SPEs) [15] [16].

3.4 Efeitos da Radiação em Dispositivos CMOS

Antes de um dispositivo poder ser utilizado no espaço, ele deve ser qualificado para garantir que irá sobreviver ao rigoroso ambiente espacial. Além da radiação um dispositivo deve estar apto a variações de temperatura, pressão e vibração.

Partículas pesadas (como prótons) perdem sua energia através de dois processos ionizantes e não-ionizantes, enquanto partículas com menor massa (como elétrons) perdem sua energia principalmente através de processos ionizantes. Partículas pesadas não carregadas (como nêutrons) perdem a sua energia através de processos não-ionizantes.

Prótons e/ou elétrons são as mais numerosas partículas em ambientes espaciais. O efeito resultante de muitas interações destas partículas produz (em média) de uma quantidade uniforme de danos em um dispositivo semicondutor. Efeitos estes cumulativos que podem ionizar o material e/ou dispositivo, e ainda podem afetar sua estrutura, denominados de efeitos de dose total ionizantes 3.4.1.2 e efeitos de danos por deslocamento 3.4.1.1. Por outro lado, efeitos de eventos singulares 3.4.2 são eventos localizados de natureza estocástica que ocorrem devido à deposição de carga (através de partículas altamente energizadas), conduzindo à geração de pares elétron/lacuna (ao longo do caminho de penetração no material semicondutor) que podem gerar perturbações elétricas transitórias (com a possibilidade de ocorrência de falhas).

3.4.1 Eventos Cumulativos (Permanentes)

A exposição à radiação produz mudanças relativamente estáveis e a longo prazo no dispositivo e em circuitos, características que podem resultar na degradação paramétrica ou falha funcional. Os efeitos de dose total ionizantes 3.4.1.2 afetam principalmente camadas isolantes, que podem resultar em armadilhas de cargas no óxido SiO_2 ou apresentar alterações na interface Si/SiO_2 . Efeitos não-ionizantes geram perda de energia que resulta em danos por deslocamento 3.4.1.1 e defeitos em materiais isolantes e semicondutores.

A energia não-ionizante depositada por irradiação de partículas induz a modificações estruturais irreversíveis no material do componente, a partir do deslocamento de átomos e criação de defeitos eletricamente ativos. Estes defeitos reduzem o tempo de vida e afetam a mobilidade, o que implica em alterações de densidade e aumento de transições não-radioativas em dispositivos ópticos, entre outros efeitos [17]. Os efeitos cumulativos podem ser medidos de duas formas diferentes de acordo com a fonte do dano, seja ele um efeito ionizante ou um efeito não-ionizante, ou devido ao seu tempo de exposição. Efeitos estes relativos a modificações estruturais no material do componente eletrônico, que por vezes podem acabar não sendo reversível.

3.4.1.1 Danos por Deslocamento

No dano por deslocamento, o comportamento da eletrônica é alterada, mas existe a possibilidade de que ela retorne ao normal. Materiais eletrônicos dependem de sua estrutura de rede cristalina para transportar uma corrente e funcionar corretamente [18]. Quando uma partícula de radiação de alta energia atinge esta estrutura, pode desalojar ou deslocar o núcleo do átomo no ponto de colisão. A energia a partir deste pode espalhar-se para criar mais deslocamentos que afetam ainda mais a estrutura. Isso impede que a eletrônica venha a transportar adequadamente uma corrente ou a funcionar adequadamente. Em alguns casos, após as colisões terem cessado, os núcleos deslocados são capazes de mover-se para trás e preencher os pontos vagos, recriando a estrutura de rede original e retornando a um estado de energia mais baixo. Claro que, mesmo se este for o caso, não há garantia de que cada núcleo irá retornar ao seu local desocupado, uma vez que alguns defeitos podem ainda vim a permanecer [19] [20].

3.4.1.2 Efeitos de Dose Total Ionizante

TID é a sigla utilizada para referenciar a dose de radiação acumulada por determinado material ou dispositivo eletrônico. Por meio da radiação, os elétrons da banda de valência dos materiais podem ganhar energia suficiente para passar para a banda de condução [21]. Uma corrente elétrica pode existir, inclusive em isolantes se, por

ventura, um campo elétrico for aplicado no material radiado [21]. Como a mobilidade das lacunas é menor que a dos elétrons, cargas positivas podem ficar armadilhadas dentro de isolantes elétricos [21]. A produção e o armadilhamento de lacunas dentro do SiO_2 causam degradação de dispositivos MOSFETs.

A ionização de um material é causada pela interação de fótons de alta energia ou partículas carregadas com o material [22]. Os danos causados por fótons ou partículas carregadas se iniciam quando pares elétrons-lacunas (PEL) são gerados no material [23].

A ocorrência de efeitos cumulativos (TID 3.4.1.2 e DD 3.4.1.1) usualmente induz à variação da tensão de limiar (V_{Th}), degradação de mobilidade (μ_0), vazamento de corrente (current leakage), e alteração da curva de sublimiar (subthreshold slope).

3.4.2 Efeitos de Eventos Singulares (SEE)

Efeitos de Eventos Singulares são o resultado de radiação ionizante que colidem fortemente com o material. Isto significa que os elétrons são empurrados para a banda de condução, gerando a criação de pequenos picos de energia. Esses picos podem causar perturbações nos componentes eletrônicos.

Soft Errors - Eventos Únicos Transientes Evento/efeito isolado (não cumulativo) de natureza reversível gerado através de ionização a partir da incidência/penetração de partículas carregadas com elevado nível de energia.

Hard Errors - Eventos Únicos Permanentes Evento/efeito isolado (não cumulativo) de natureza permanente gerado através de ionização a partir de uma variedade de efeitos destrutivos (rompimento do óxido de porta, latch-up, entre outros).

Efeitos não cumulativos de caráter transitório (SEE 3.4.2) afetam predominantemente a operação de sistemas digitais a partir da ocorrência de pulsos de tensão e corrente de curta duração que podem gerar a inversão de níveis lógicos, impactando na integridade do sinal em estruturas combinacionais (efeito transiente), ou na integridade da informação armazenada em unidades de memória (efeito estático). Ocorrem ainda como efeitos de caráter permanente através de eventos destrutivos (rompimento do óxido de porta).

4 Estratégias de Mitigação

Mitigação (ou blindagem) é a técnica em que se tenta fazer uma proteção em situações extremas. Desta forma, a direção tomada pelas atividades de pesquisa e a classe geral de soluções dela resultantes remete ao conceito de projeto orientado à robustez ou *endurecimento* aos efeitos da radiação (*radiation hardening*), bem como a um critério geral de classificação para as estratégias de projeto a serem aplicadas [24]:

RHBP (Radiation Hardening by Process) Robustez à radiação através de técnicas de processo de fabricação;

RHBD (Radiation Hardening by Design) Robustez à radiação através de técnicas de projeto ou concepção de dispositivos.

Com os elevados custos sobre as técnicas de RHBP, foi proposto a pesquisa e desenvolvimento através de métodos baseados em RHBD. A partir deste critério, uma ampla variedade de estratégias de projeto tem sido proposta para a implementação de estruturas *endurecidas*. As características do método a ser implementado (dependente do tipo de fenômeno e da natureza do circuito) envolvem a concepção/dimensionamento de estruturas em diferentes etapas de projeto (esquemático e leiaute), bem como em diferentes níveis de hierarquia (dispositivo, circuito, módulo e sistema).

4.1 Técnicas em nível de dispositivo

Em nível de dispositivo foi usado transistores ELT, os quais são bem eficazes para reduzir a degradação elétrica causada por radiação ionizante em transistores, principalmente efeitos ocasionados por efeitos de Dose Total Ionizante 3.4.1.2. Onde esta técnica envolve um dos terminais pelo poli-silício da porta (*gate*), dessa forma se elimina as regiões ativas que encontram-se entre dreno (*drain*) e fonte (*source*). Não há óxido em contato com os terminais de dreno (*drain*) e fonte (*source*) por onde possa criar um canal parasitário (acúmulo de cargas), evitando o aumento de caminhos de corrente de fuga induzida por radiação. Este dispositivo ainda oferece vantagens como: possuir em um baixo consumo de energia, alto desempenho, alta produtividade, curtos tempo de resposta, de baixo custo quando expostos em ambientes hostis em relação ao MOSFET padrão, assim como dimensões pequenas afim de ter um óxido mínimo, afim de evitar acúmulo de TID 3.4.1.2.

4.2 Técnicas em nível de circuito

As técnicas de proteção em nível de circuito têm uma vantagem sobre as técnicas em nível de dispositivo no sentido de não necessitarem de mudanças fundamentais no processo de fabricação [25]. Neste trabalho se fez uso de redundância 4.3 e de um circuito diferencial, onde as principais vantagens do diferencial em relação ao single-ended são relacionadas a alta rejeição do ruído de modo comum, melhor isolamento, atenuação de harmônicos, diminuição da dependência do circuito à variáveis externas e melhoria no ruído de fase. Porém, esta abordagem necessita do dobro de componentes, impactando na área de chip, e consome aproximadamente o dobro da potência

4.3 Técnicas em nível de Sistema

As técnicas de proteção em nível de sistema são técnicas adequadas para mitigação de *soft errors* e são as baseadas em redundância e votação, as quais possuem tanto a capacidade de detecção de erros como correção. A técnica baseada em redundância e votação amplamente usada é a Redundância Modular Tripla (TMR - *Triple Modular Redundancy*). Consiste em triplicar o circuito a ser protegido e conectar suas saídas a um votador de maioria. Se algum erro ocorrer em uma das três cópias do circuito e as demais operarem corretamente, o valor correto é escolhido pelo votador. É uma técnica com ênfase em tolerar falhas aleatórias, que presumidamente ocorrem de maneira independente nas cópias redundantes.

Sendo assim, se fez uso de *buffers* entres os anéis afim de se proteger os sinais, e conectar a saída desses *buffers* a um votador para gerar o sinal protegido. O votador tem formação e comportamento descritos na figura 3, em que se observa que sua saída é atualizada apenas quando os *buffers* geram valores iguais, ou assumem a maioria.

O custo associado com os *buffers* redundantes é minimizado com o reuso de recursos já existentes no circuito integrado, como múltiplas funções em vários estágios de fabricação e uso em campo. Resultados mostram que essa técnica melhora a SER em 10 vezes sobre um projeto desprotegido, com baixo prejuízo em área, desempenho e potência [26].

5 Oscilator Controlado por Tensão (VCO)

O VCO consiste em um bloco construtivo analógico para a geração do sinal de saída, cujos parâmetros de operação (frequência e fase) serão monitorados pelo sistema realimentado (PLL) através de um sinal de controle (aplicado como entrada). A função de correlação entre frequência e fase (sinal de saída) e nível de tensão de controle (sinal de entrada) está associada com as características do método de implementação (a partir do princípio de operação envolvido).

Neste trabalho propõem ser implementado um oscilador com arquitetura em anel, o qual consiste num número ímpar de amplificadores em uma malha realimentada. Uma vez que cada amplificador possui um atraso característico, o mesmo pode-se chamar de célula de atraso, as quais são feitas diferenciais auto-polarizadas (com controle de frequência através de injeção de corrente), com *buffers* de interconexão (com 3 estágios). Esta configuração permite um controle da capacitância de carga ligada à estrutura em anel, elevação da capacidade de acionamento. Seguido pelos divisores de frequência e *flip-flops* para um melhor ajuste na faixa de frequência, e geração de envoltória adequada ao acionamento do sistema digital, conforme ilustrado através da figura 3.

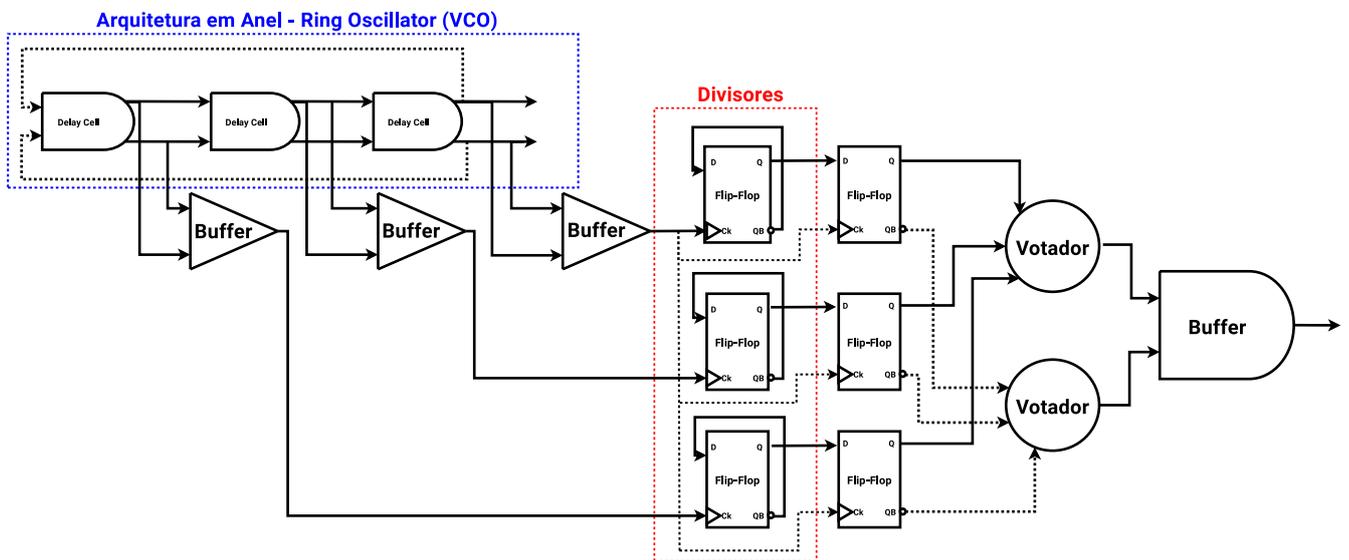


Figura 3 – Proposta de arquitetura baseada em TMR para implementação de robustez a SEE

De acordo com a atual versão de referência, a célula de atraso emprega uma topologia diferencial (*fully differential topology*) com elementos de redundância para a implementação de robustez à ocorrência de TID 3.4.1.2. O método para controle de

frequência envolve injeção de corrente DC a partir de tensão aplicada aos dispositivos PMOS (M1 e M2 - Destacados com contorno em vermelho), conforme indicado através da figura 4.

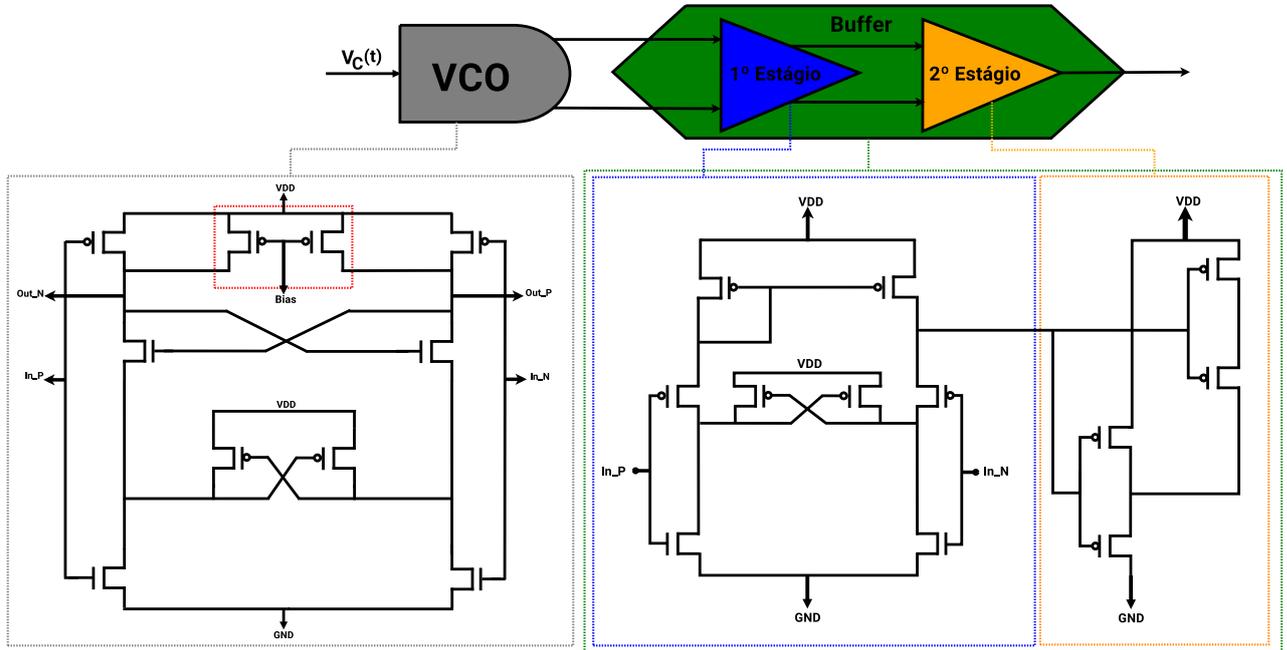


Figura 4 – Oscilador Controlado por Tensão VCO: Célula de atraso

6 Cronograma de Atividade

Tabela 1 – Cronograma de Trabalho

Atividades	Ano	Mês
Levantamento da Bibliografia Básica	2015	9/10/11
Estudos sobre Efeitos da Radiação Ionizantes	2015	11/12
Pesquisa/implementação de topologias	2016	01/02
Simulação em nível de Circuito (VCO)	2016	03/04/05/06/07
Revisão Arquitetural (Reimplementação)	2016	06/07/08
Revisão de Projeto (Implementação de técnicas de robustez)	2016	08/09/10/11
Escrita da Dissertação	2016 /17	12/01
Defesa da Dissertação	2017	02

Sendo assim, o projeto encontra-se em desenvolvimento, porém em caráter avançado, cumprindo até o momento o cronograma, haja vista que apesar de ser um trabalho de dissertação para obtenção de título de mestre em telecomunicações pela faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), este trabalho tem cunho estratégico e terá aplicação usual e integrará um sistema de uso do CTI Renato Archer, através do projeto CITAR - Circuitos Tolerantes à Radiação, afim de atender os requisitos exigidos para o pleno funcionamento do PLL.

7 Resultados Parciais

No presente momento (Outubro de 2016), o projeto se encontra em seu 18° mês de execução. Foram realizadas as 05 (cinco) das 08 (oito) etapas do cronograma 4.2 da tabela 6.

Conforme exposto de forma sucinta nos itens anteriores, foi realizada uma revisão bibliográfica paralelamente ao estudo da radiação, tecnologia 2.1, topologias e técnicas de mitigação 4 de forma a criar uma base de conhecimento para o desenvolvimento da dissertação proposta.

O VCO está em fase avançada de desenvolvimento, o qual possui topologia definida 5, e está em processo de caracterização final, seguindo técnicas de mitigação para uma maior robustez à radiação ionizante, entrando em uma fase de ajustes em suas dimensões para um perfeito funcionamento. Este conjunto de termos representam alguns dos parâmetros de desempenho do VCO:

Faixa de Frequência Sintonizável (*Tuning Range*): intervalo de frequências de saída no qual o VCO oscila ao longo da extensão da tensão de controle;

Frequência de Saída (f_0): quando a tensão de controle está em seu valor central (neste trabalho a frequência central será de 200MHz);

Sensibilidade (*Tuning Sensitivity*): mudança na frequência de saída por unidade de variação na tensão de controle;

Consumo DC: energia consumida pelo Oscilador (neste trabalho a energia máxima não deve ultrapassar $6mA$);

Capacitância: parâmetro de suma importância, o qual se estiver num nível elevado pode mudar o pólo de filtro, assim desestabilizando a malha (PLL), a qual o VCO está inserido, para este trabalho o valor máximo de capacitância não deve ultrapassar 9p.

O desenvolvimento/simulação elétrica está sendo feito em Cadence Virtuoso Analog Environment ADE, fazendo uso de simuladores Spectre e SpectreRF. As análises que estão sendo realizadas são: análise transiente para medições de frequência, DC para as medidas de consumo, análise SP (*S-Parameter*) para aferir a capacitância do bloco e análises PSS (*periodic steady state*) combinadas com análises PNOISE (*periodic noise*) para simular o ruído de fase. Através deste ambiente, as simulações estão sendo executadas e **testes aos efeitos transitórios 3.4.2 originados pela radiação**, buscando

cumprir as exigência de projeto impostas pelo sistema o qual este VCO está inserido, a partir de tecnologia UMC DARE180 (componentes com geometria fechada - Enclosed Layout Transistor ELT).

O VCO possui uma banda que corresponde entre 65MHz e 500MHz, com um K_{VCO} mais estável possível, o qual é um dos principais fatores que formam o ganho da malha DC, com grande influência na estabilidade. A variação foi feita através de uma análise transiente, onde se fez uso de uma varredura paramétrica na tensão de entrada (polarização/controlre) do VCO.

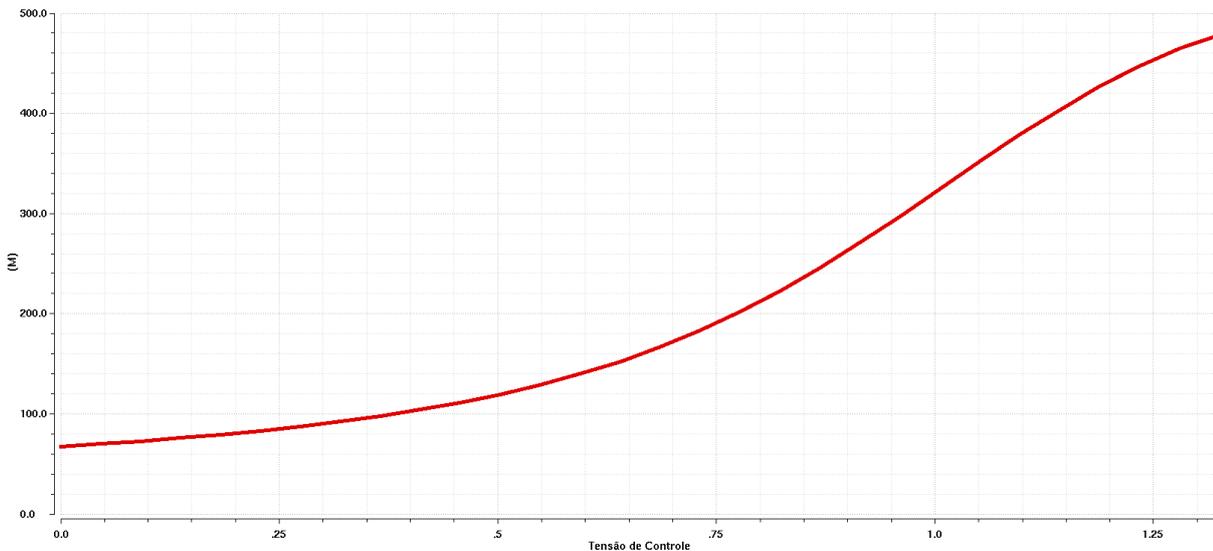


Figura 5 – Curva da Variação de Frequência pela Tensão (KVCO)

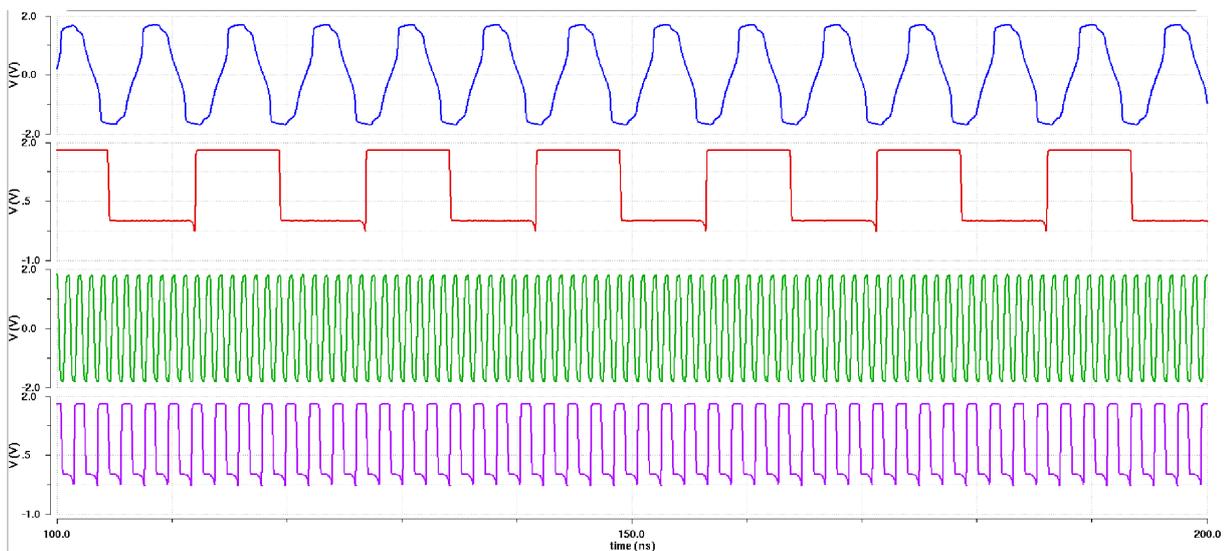


Figura 6 – Saídas de sinal do VCO com diferentes tensão de controle

Também é possível observar o atraso de fase que a célula causou no sinal de referência 6. Esse atraso que a célula causa no sinal é o responsável pela oscilação do VCO, onde o descrito em azul (senoide) é a forma de onda obtida na saída das células de atraso com tensão de controle mínima, em vermelho (quadrada) é a forma de onda pega na saída do VCO com tensão de controle mínima, após os estágios de (*Buffers, Divisores e Flip-Flops*). Em verde é o mesmo procedimento na saída das células de atraso, porém com tensão de controle máxima, e em lilás é o mesmo procedimento na saída do VCO, após os estágios de (*Buffers, Divisores e Flip-Flops*), com tensão de controle máxima.

Em relação aos blocos adjacentes (*Buffers, Divisores e Flip-Flops*), considera-se praticamente finalizados, os quais já possuem topologias definidas, tamanhos e cumprindo todos os parâmetros inerentes, e participam/integram a simulação, alguns destes já se encontram em caráter físico (leiaute), os quais foram gerados em Cadence Virtuoso Layout Suite XL, como mostrados nas figuras 7 e 8.

Os *Buffers* tem a função de proteger os circuitos anteriores a ele, assim como garantir que as variações da impedância de carga em relação as condições externas ao circuito. Desta forma, eles representam uma estrutura física de isolamento que garante a estabilidade das células de atraso (que compõem a estrutura em anel) a variações de carga.

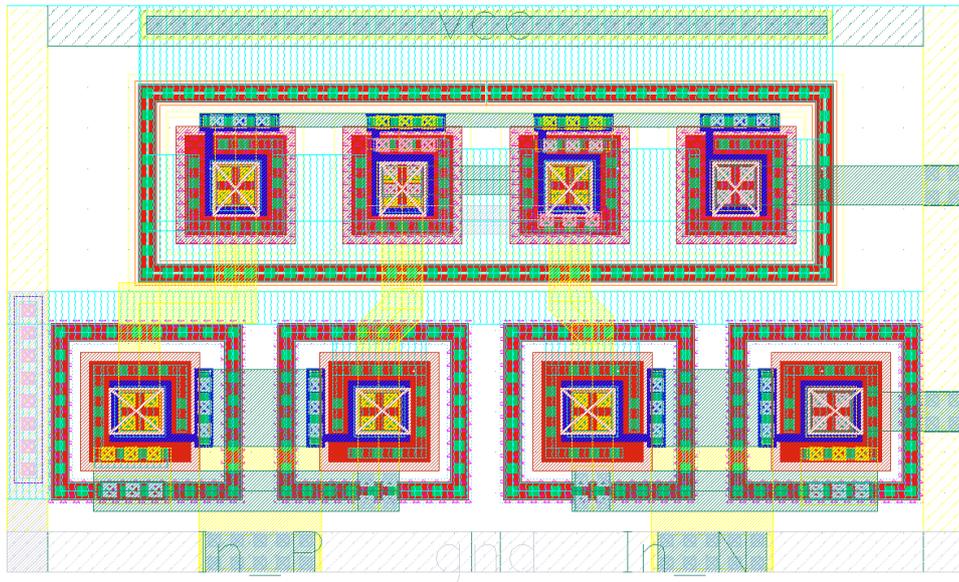


Figura 7 – Buffer de conexão entre as células de atraso

Os divisores de frequência 8 têm como objectivo a obtenção de um sinal com frequência inferior a partir de outro com frequência maior. Para esse efeito implementou-

se um divisor de frequência baseado em flip-flops do tipo D. Este tipo de divisores de frequência tem as seguintes características:

- Divisão inteira de frequência;
- Fase e frequência coerente com o sinal fonte sobre as variações de ambiente.

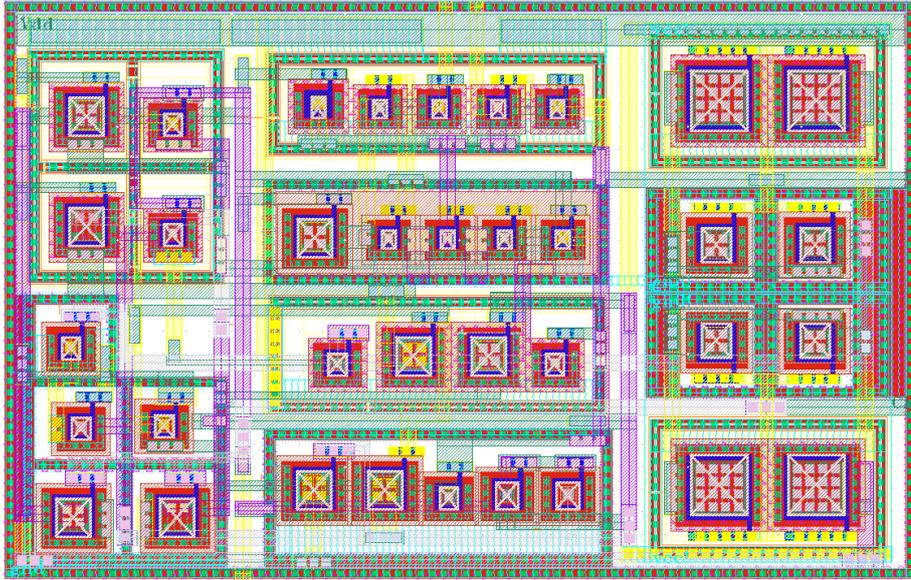


Figura 8 – Divisor de Frequência e Flip-Flop

O votador 9 está com topologia definida, e valores definidos, faltando apenas seu leiaute (físico), é necessário pois é este circuito que seleciona os majoritários com relação ao sistema TMR.

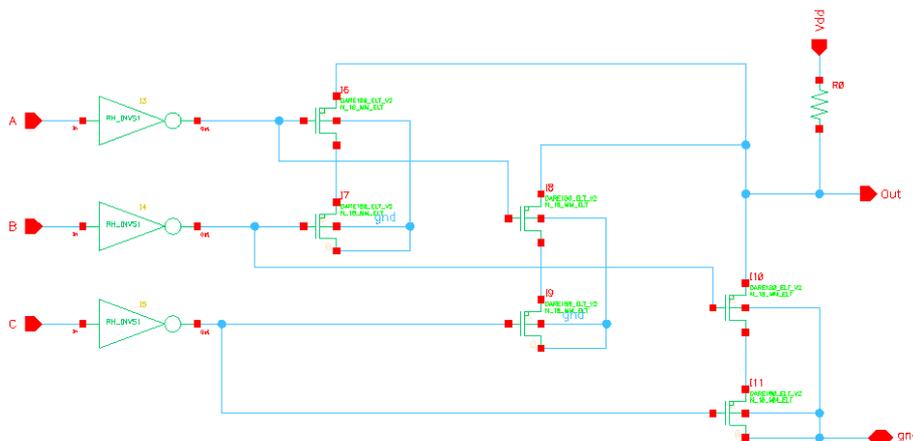


Figura 9 – Votador Analógico

Referências

- [1] A. L. de Almeida, “A evolução do poder aeroespacial brasileiro,” Master’s thesis, Universidade de São Paulo (USP), 2006.
- [2] G. P. Miranda, “Sistema para medição da atenuação devido á chuva em enlaces de satélites na banda Ku,” Master’s thesis, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2012.
- [3] S. Haykin, *Sistemas de Comunicação: Analógicos e Digitais*, 4th ed., J. C. B. dos Santos, Ed. Bookman, 2004.
- [4] T. R. Balen, “Efeitos da radiação em dispositivos analógicos programáveis (FPAAs) e técnicas de proteção,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2010.
- [5] Y. Taur, D. A. Buchanan, W. Chen, D. J. Frank, K. E. Ismail, S. H. Lo, G. A. Sai-Halasz, R. G. Viswanathan, H. J. C. Wann, S. J. Wind, and H.-S. Wong, “CMOS scaling into the nanometer regime,” in *Proceedings of the IEEE*. IEEE, Abril 1997, vol. 85, no. 4, pp. 486–504.
- [6] G. C. Messenger, “A summary review of displacement damage from high energy radiation in silicon semiconductors and semiconductor devices,” in *IEEE Transactions on Nuclear Science*. IEEE, Junho 1992, vol. 39, no. 3, pp. 468–473.
- [7] S. Manea. (2016, Junho) Exemplo de física aplicada à independência tecnológica do país. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Sociedade Brasileira de Física. [Online]. Available: http://www.sbfisica.org.br/v1/index.php?option=com_content&view=article&id=768:projeto-citar&catid=150:opinioao&Itemid=316
- [8] C. R. Archer. (2013, Julho) Cti renato archer inaugura projeto de tecnologia espacial na cidade de atibaia-sp. CTI Renato Archer. [Online]. Available: cti.gov.br/ultimas-noticias/264-cti-renato-archer-inaugura-projeto-de-tecnologia-espacial-na-cidade-de-atibaia-sp
- [9] E. S. Agency. (2016) Spacewire. European Space Agency. [Online]. Available: spacewire.esa.int/content/Home/HomeIntro.php
- [10] S. Taube, V. Petrovic, and M. Krstic, “Fault tolerant implementation of a spacewire interface,” in *2014 21st IEEE Int. Conf. Electron. Circuits Syst.* IEEE, dec 2014, pp. 614–617.

- [11] T. J. Girardi, L. Atmosférica, C. R. S. de Pesquisas Espaciais, and H. Takahashi, "Estudo da aeroluminescência ionosférica na região da anomalia geomagnética da américa do sul."
- [12] M. A. C. Garcia and R. M. F. da Silva, "Estudo dos efeitos das explosões solares na região da anomalia magnética do atlântico sul (amas)."
- [13] J. T. Borba¹, O. J. Pereira, and Â. A. Leithold, "Radiobservação na região da anomalia magnética do atlântico sul."
- [14] E. Echer, N. R. Rigozo, D. J. R. Nordemann, L. E. A. Vieira, A. Prestes, and H. H. De Faria, "On umero de manchas solares, índice da atividade do sol," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 25, no. 2, p. 157, 2003.
- [15] C. A. Federico, O. L. Gonzalez, L. V. E. Caldas, L. Bruck *et al.*, "Estudo da dose devida à radiação cósmica em tripulações no espaço aéreo brasileiro," *Anais do VIII Simpósio de Transporte Aéreo VIII SITRAER/II RIDITA*, pp. 337–348, 2009.
- [16] M. F. Bahia, *Proteção Solar*. Editora da Universidade do Porto, 2003.
- [17] R. Velazco, P. Fouillat, and R. Reis, *Radiation Effects on Embedded Systems*. Springer Netherlands, 2007.
- [18] A. C. Tribble, *The space environment: implications for spacecraft design*. Princeton University Press Princeton, 2003.
- [19] J. Srour, C. J. Marshall, and P. W. Marshall, "Review of displacement damage effects in silicon devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, pp. 653–670, 2003.
- [20] G. P. Summers, E. A. Burke, and M. A. Xapsos, "Displacement damage analogs to ionizing radiation effects," *Radiation measurements*, vol. 24, no. 1, pp. 1–8, 1995.
- [21] A. Holmes-Siedle and L. Adams, "Handbook of radiation effects," 1993.
- [22] J. R. Schwank, "Basic mechanisms of radiation effects in the natural space radiation environment," Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), Tech. Rep., 1994.
- [23] H. Barnaby, "Total-ionizing-dose effects in modern cmos technologies," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, no. 6, pp. 3103–3121, 2006.
- [24] M. Gorbunov, "Radhard by design methods and approaches," 2015.
- [25] P. E. Dodd, "Device simulation of charge collection and single-event upset," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, no. 2, pp. 561–575, 1996.

-
- [26] M. Zhang, S. Mitra, T. Mak, N. Seifert, N. J. Wang, Q. Shi, K. S. Kim, N. R. Shanbhag, and S. J. Patel, "Sequential element design with built-in soft error resilience," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 14, no. 12, pp. 1368–1378, 2006.