



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
COORDENADORIA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INTEGRAÇÃO ACADÊMICA  
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EM DESENVOLVIMENTO  
TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO

**Wendeurick Emerick Silverio**

## **RELATÓRIO PARCIAL**

### **INICIAÇÃO CIENTÍFICA:**

PIBIC CNPq ( ), PIBIC CNPq Ações Afirmativas ( ), PIBIC UFPR TN (x), PIBIC Fundação Araucária ( ), PIBIC Voluntária ( ), PIBIC Ações Afirmativas Voluntária ( ) ou PIBIC EM.

08/2015 a 07/2016

## **Simulação e projeto de amplificadores de potência RF em tecnologia CMOS**

Relatório apresentado à Coordenadoria de Iniciação Científica e Integração Acadêmica da Universidade Federal do Paraná por ocasião da conclusão das atividades de Iniciação Científica - Edital 2015/2016.

**Orientador: Bernardo Rego Barros de Almeida Leite / Departamento de Engenharia Elétrica**

**Projeto de pesquisa: Projeto de circuitos integrados e componentes passivos para sistemas de comunicação sem fio / 2012006108**

**CURITIBA**  
2017

# Sumário

<b>1</b>	<b>RESUMO</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>4</b>
3.1	Métricas para amplificadores de potência . . . . .	4
3.2	Amplificadores de potência programáveis . . . . .	4
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>8</b>

# 1 RESUMO

O projeto de pesquisa tem por objetivo uma compreensão e concepção de sistemas de circuitos integrados de radiofrequência, aprendizagem do uso de ferramentas computacionais de circuitos integrados e a utilização desses conhecimentos em simulações e projetos de amplificadores de potência (PAs). As etapas seguintes terão como base dois circuitos previamente projetados e testados, ambos apresentados para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPR na dissertação de mestrado de Edson Leonardo dos Santos e Fávero Guilherme Santos. Os dois apresentam estágios com reconfigurabilidade, sendo um no estágio de ganho e outro no estágio de potência.

O projeto de iniciação científica começou com um estudo bibliográfico e em seguida teve um período de familiarização e adaptação com as ferramentas necessárias para o início da fase de simulações. Foram utilizados o ambiente ADE XL e o simulador Spectre RF na plataforma de Cadence Virtuoso. O próximo passo foi realizar simulações com fontes de sinal modulado na entrada do amplificador. Foram consideradas para os sinais modulados normas de redes WPAN (Zigbee), WLAN (IEEE 802.11n - WiFi), e telefonia celular (LTE). Nesta análise, traçaram-se o espectro de saída do PA, permitindo a obtenção da razão de potência no canal adjacente (ACPR), e também a constelação de saída, permitindo a obtenção da magnitude do erro vetorial (EVM) associada a cada uma das normas. Com base nestes resultados, foi elaborada documentação descrevendo a configuração recomendada do simulador para estas análises na simulação de amplificadores de potência de radiofrequência.

## 2 INTRODUÇÃO

O mundo de hoje é conectado por um grande número de sistemas de comunicação, em sua grande maioria sem fio. Muitas deles operam na região de 2,4 GHz, como IEEE 802.15.4, IEEE 802.11n e LTE.

Zigbee (IEEE 802.15.4) define um conjunto de protocolos de comunicação adaptado a redes de sensores com baixa taxa de transmissão de dados, distâncias curtas de transmissão e baixo consumo de energia. Dispositivos baseados em Zigbee operam nas bandas de 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz. A taxa máxima de transmissão é de 250 kbit/s. Zigbee é usado principalmente para aplicações alimentadas por bateria onde baixa transferência de dados, baixo custo e longa duração de bateria são características desejadas. Em muitas aplicações, o tempo total do dispositivo usado para efetivamente fazer alguma transmissão ou recepção é muito curto, gastando a maior parte do tempo em modo de espera. Como resultado, a bateria de dispositivos que utilizam esse protocolo podem durar anos [z]. Como a camada de controle de acesso ao meio (MAC) e a camada física (PHY) são definidas pelas normas IEEE 802.15.4, a modulação em 2,4 GHz é definida como QPSK.

Uma rede local sem fio baseada nas normas da IEEE 802.11 leva o nome de Wi-Fi. As normas da IEEE 802.11 são um conjunto de especificações para as camadas MAC e PHY para implementação de WLANs para comunicação em frequências de 2,4 GHz, 3,6 GHz, 5 GHz e 60 GHz. Uma das atualizações da norma, a qual recebeu o nome de IEEE 802.11n, trabalha com frequências de 2,4 GHz e 5 GHz, tem como principal característica um processo que permite uso de mais de uma antena para transmitir e receber dados (MIMO) o que aumenta a taxa de transmissão. O padrão 802.11n é capaz de fazer transmissões na faixa de 300 Mb/s e, teoricamente, pode atingir taxas de até 600 Mb/s. No modo de transmissão mais simples, com uma via de transmissão, o 802.11n pode chegar à casa dos 150 Mb/s. Os modos de modulação definidos pela norma são BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM [wlan].

Long Term Evolution (LTE), é uma norma de comunicação móvel de alta taxa de transmissão de dados. As frequências de operação vão de 700 MHz até 2600 MHz. Um dos objetivos para a criação de tal norma foi para recriar e simplificar a arquitetura de redes para sistemas baseados em IP, com notável redução de latência comparada a arquitetura 3G. O esquema de modulação para transmissões de terminais móveis para estações rádio-base são QPSK e 16QAM, enquanto que para transmissões a partir das estações rádio-base também é incluído 64QAM[lte].

Um fator determinante para um dispositivo móvel é a duração de sua bateria. Esta característica é determinada pelos seus componentes que mais consomem potência e afetam diretamente a satisfação dos consumidores [fav]. Em um receptor de radiofrequência, um dos componentes mais importantes e um dos que consomem mais potência é o amplificador de potência (PA). A função de um PA é tornar um sinal fraco em forte, sem acrescentar distorções significativas para uma larga faixa de valores de potências [leo]. Para que ele tenha um comportamento adequado deve-se manter um compromisso entre a linearidade, ganho de potência, estabilidade e eficiência. Um circuito amplificador é constituído principalmente por um estágio de ganho, um estágio de potência e redes de casamento de impedância.

Para conseguir um menor consumo em um PA é possível fazê-lo programável, com diversos modos de funcionamento. Assim, quando não é necessário transmitir a máxima potência de saída, o circuito pode operar em um modo de menor consumo de potência. A reconfigurabilidade pode estar presente em várias partes do circuito, incluindo o estágio de ganho ou no estágio de potência

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Métricas para amplificadores de potência

Para um amplificador de potência proposto para comunicação móvel ou sem fio, potência de saída, eficiência, ganho e linearidade são algumas das mais importantes características, e estas podem ser facilmente quantificadas. Por outro lado custo e confiabilidade não são tão simples de se quantificar embora suas importâncias não devam ser subestimadas [pat].

A potência de saída, definida como a potência ativa entregue pelo PA à antena, necessária para um amplificador é determinada inteiramente pelas aplicações a que se destinam. Estabilidade é um fator crítico em amplificadores de potência RF, uma vez que os dispositivos modernos RF são potencialmente instáveis [cripps]. O PA não deve oscilar independente de qual fonte e carga estejam ligadas na entrada e na saída. A instabilidade pode ocorrer devido à realimentação do sinal ou ganho excessivo em frequências fora da banda.

Usualmente os amplificadores de potência são divididos em várias classes. Em RF, essas diferentes classes são divididas basicamente em dois grupos: amplificadores lineares e não-lineares. Os amplificadores lineares são classificados em A, AB, B e C, no entanto, esses amplificadores apresentam uma eficiência mais baixa. Os amplificadores não-lineares são classificados em D, E e F, entre outras, sendo capazes de alcançar eficiências mais altas. Nos amplificadores lineares, o transistor do PA opera como uma fonte de corrente controlada, enquanto que nos amplificadores não-lineares, o transistor do PA opera como uma chave.

Um grande número de métricas são relevantes quando se quer avaliar a linearidade de um PA. Por exemplo, análise linear de pequenos sinais é feita utilizando parâmetros-S a fim de avaliar o coeficiente de reflexão, ganho direto, isolamento e estabilidade. Caracterização de grande sinais é também muito útil, pois permite observar o comportamento na saída do PA conforme ocorre uma variação na entrada. Quando observado o módulo da potência da saída em função da potência de entrada (curva AM-AM), podemos tirar informações como ponto de compressão de 1dB e a potência de saída saturada. Entretanto, quando avaliado a variação de fase de saída conforme a entrada é variada (cuva AM-PM), podemos observar que mesmo sendo um sinal de formato constante aplicado a entrada é observado distorções na saída. Para avaliar a eficiência do circuito usa-se a métrica de eficiência de potência adicionada (PAE), que é uma relação entre a diferença da potência de saída com a entrada em relação a potência DC adicionada ao circuito.

Outra parte crucial na análise da linearidade de um PA é sua avaliação com um sinal modulado na entrada. Como o PA introduz distorções, a constelação de saída não é a mesma que a constelação de entrada. Uma métrica para a medida deste tipo de distorção é a magnitude do vetor de erro (EVM). Essa métrica consiste em fazer a raiz da média da distância entre o ponto da constelação em sua entrada e saída. O impacto da não-linearidade não é visto somente no canal de transmissão, é necessário então quantizar o valor de potência que é dissipado nas bandas adjacentes, e isso é feito pela métrica razão de potência do canal adjacente (ACPR), esta é uma relação da potência dissipada na banda de transmissão pela potência nas bandas laterais, tanto superior quanto inferior.

### 3.2 Amplificadores de potência programáveis

A transcondutância de um MOSFET depende diretamente do seu comprimento de canal. Então, transistores com maiores tamanhos de canal alcançam maiores valores de potência

de saída a um custo maior de potência DC. Então é possível habilitar ou desabilitar transistores de diferentes tamanhos dentro do circuito visando a potência de saída desejada[**fav**].

Este trabalho terá como base dois amplificadores de potência que utilizam essa arquitetura, sendo que em um a reconfigurabilidade se encontra no estágio de potência e o outro se encontra no estágio de ganho.

Primeiramente o amplificador de [**leo**] com controle de ganho é apresentado para aplicações em 2,4 GHz, o esquemático do circuito pode ser vista na figura 1 juntamente com uma micrografia do chip fabricado.

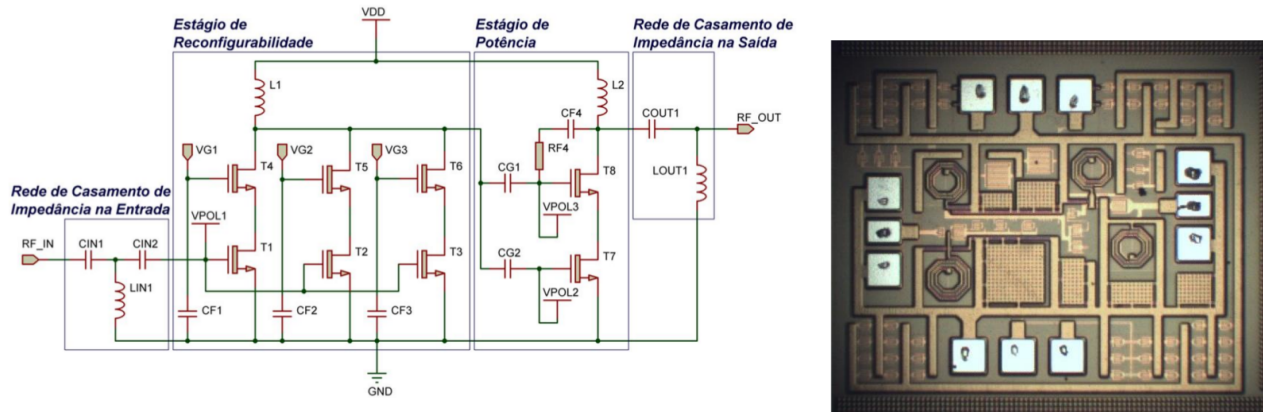


Figura 1: (a) Esquemático e (b) micrografia de [**leo**].

O ganho de potência pode ser controlado digitalmente em seis modos através da combinação de três bits. Esta técnica foi utilizada para alcançar uma melhora na eficiência em potências de recuo. O projeto foi implementado usando uma tecnologia CMOS 0,13  $\mu\text{m}$  e é capaz de fornecer um ganho de potência variável entre 22,4 dB e 31 dB, os modos intermediários podem ser vistos na figura 2, uma eficiência máxima de 19%, com uma fonte de alimentação de 1,8 V. A potência consumida pelo amplificador é reduzida de 196,2 mW no modo de maior ganho para 171 mW no modo de menor ganho, permitindo uma eficiência melhor quando o ganho máximo não é necessário para a transmissão[**leo**].

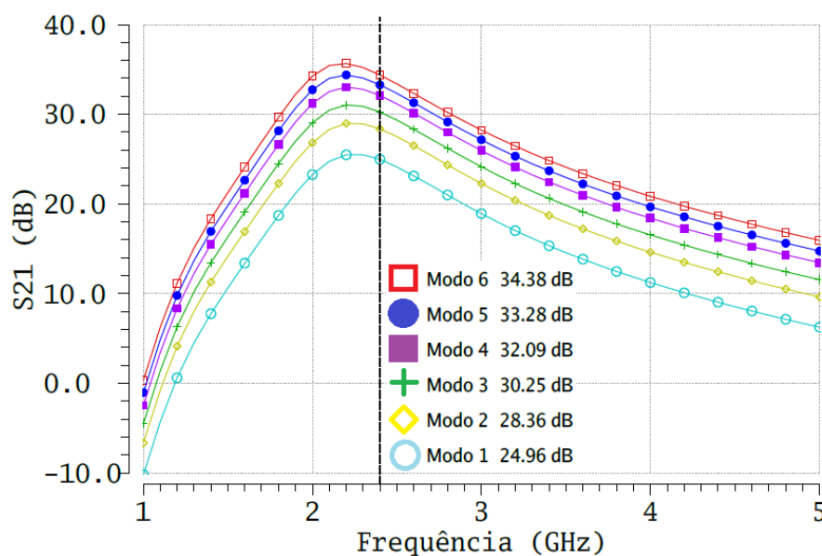


Figura 2: Ganhos de [**leo**].

O próximo circuito é apresentado em [**fav**], o qual o PA apresentado possui o estágio de

potência reconfigurável o seu esquemático pode ser visto na figura 3 juntamente com o seu leiaute.

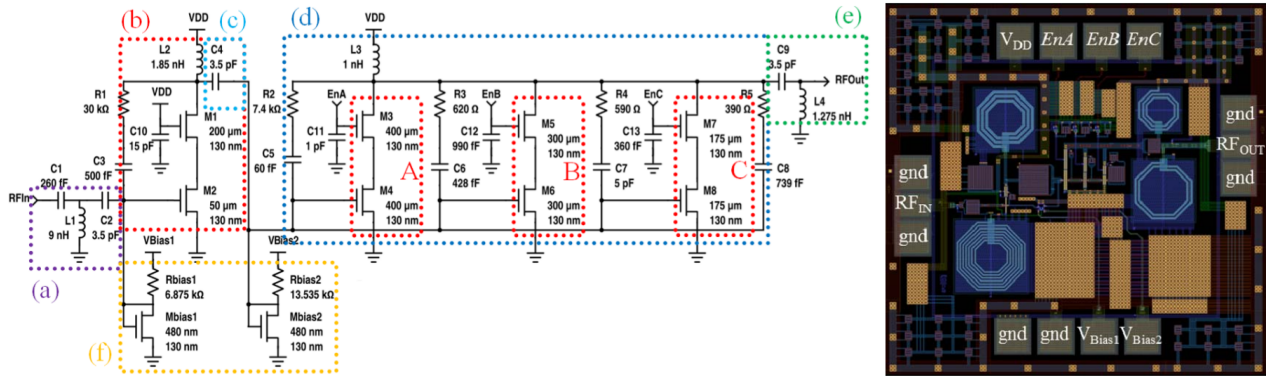


Figura 3: Esquemático: casamento de impedância de entrada (a), estágio de ganho (b), componente de casamento (c), estágio de ganho reconfigurável (d), casamento de impedância de saída (e), e circuitos de referência de tensão para polarização. A figura ao lado é o leiaute de [leo].

Este PA tem 7 modos de operação para alcançar uma grande faixa de potência de saída e reduzir a potência DC. O PA foi implementado usando tecnologia CMOS 0,13  $\mu\text{m}$ . Trabalha na faixa de 2,4GHz com alimentação de 1,8V. O modo de menor ganho possui 8.1 dBm de potência saturada, 13.5 dB de ganho de potência e consome 171 mW de potência DC. No modo de maior ganho a potência saturada de saída é de 18.9 dBm com ganho de potência de 21.1 dB consumindo 415 mW de potência DC. Um gráfico dos ganhos apresentados nos outros modos pode ser visto na figura 4.

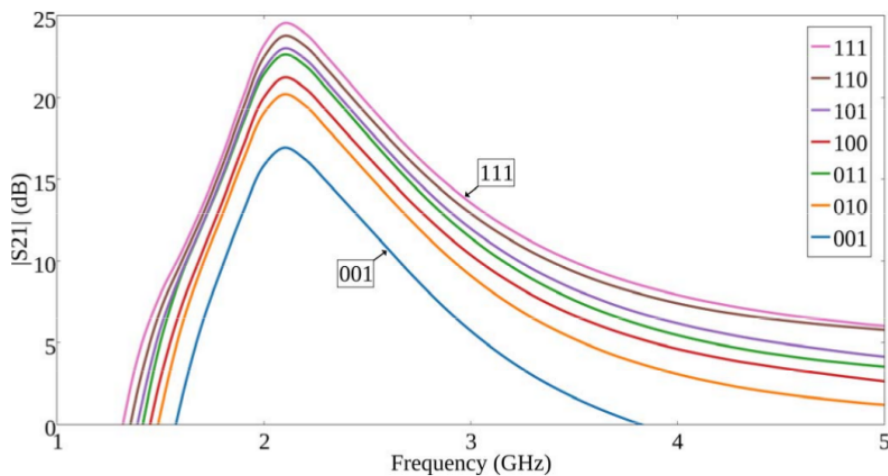


Figura 4: Ganhos de [leo].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

As simulações serão todas realizadas no software Cadence Virtuoso, sendo utilizado o ambiente ADE XL e o simulador Spectre RF. Para as análises de linearidade com sinais modulados, será utilizada uma análise do tipo Envelope pois esta análise tem um melhor desempenho do que uma simulação transiente quando processos rápidos e lentos ocorrem ao mesmo tempo no circuito. O termo para este tipo de simulação é simulação multitaxa. Na simulação transiente, um grande número de ciclos de um sinal rápido deve ser simulado para adquirir um comportamento lento do circuito. Logo, ao invés de se simular todo o processo, a análise envelope pula vários ciclos do sinal rápido para avaliar as mudanças lentas. Todavia, mesmo pulando vários ciclos, o resultado é quase tão preciso quanto análise de transiente.

Os dados procurados nessa simulação são basicamente vetor de magnitude de erro (EVM - Error Vector Magnitude), que é uma indicação da qualidade de transmissão. Devido às não-linearidades do amplificador, a posição dos símbolos no diagrama I-Q pode ser deslocada da posição ideal. Cada protocolo tem um valor máximo para EVM [z]. Outra informação desejada é a relação de potência do canal adjacente.

Será projetado um circuito combinando os PAs com reconfigurabilidade, o estágio de ganho do PA em [leo] e o estágio de potência do PA em [fav] afim de ter um PA com dois estágios de reconfigurabilidade podendo ter um controle ainda maior na potência de saída e eficiência do PA.



## **5 REFERÊNCIAS**