



# Driver de corrente dedicado a amplificadores de potência

Bruno Machado, André Mariano, Bernardo Leite.

UFPR, Curitiba, Brasil  
bruno.machado@ufpr.br

**Resumo**—Este artigo descreve o design e a aplicação de um driver de corrente controlado digitalmente para fornecer energia a amplificadores de potência reconfiguráveis em tensão, implementado na tecnologia 130 nm CMOS. Operando de 1,1 V a 1,8 V, o circuito proposto é uma solução integrada para alternar a tensão de alimentação de amplificadores de potência reconfiguráveis usando apenas um controle digital. Este circuito permitiu uma solução integrada para alimentar um PA com diferentes níveis de tensão, consumindo apenas 26,9 mW no modo de maior consumo e tendo uma baixa intervenção nos parâmetros do amplificador, apenas 0,18 dB de diferença no ganho de pequenos sinais, 0,4 dB no ponto de compressão de 1 dB e 11,79% na PAE, para o pior caso.

## I. INTRODUÇÃO

O mundo está cada vez mais conectado e o número de dispositivos que estão se comunicando entre si está aumentando substancialmente. A projeção para 2025 é que 75,44 bilhões de dispositivos vão estar conectados [1], em um fenômeno chamado internet das coisas (IoT).

Uma grande quantidade desses dispositivos é móvel, o que requer o uso de baterias como fonte de alimentação. No entanto, ao usar baterias, é essencial levar em consideração a vida útil delas. Para prolongar a vida útil das baterias, é imperativo reduzir o consumo de energia desses dispositivos eletrônicos.

Um dos blocos que consome mais energia em dispositivos móveis é o amplificador de potência (PA) [2], que é responsável pela amplificação do sinal de radiofrequência (RF) nos transmissores de RF. Tradicionalmente, os PAs são projetados para o pior cenário de transmissão, quando a potência de saída nos transmissores é máxima. No entanto, como esse cenário ocorre em momentos específicos da operação dos dispositivos, é possível otimizar o consumo de energia desse PA através da reconfigurabilidade de sua tensão de alimentação. Isso implica que quando o PA não requer a potência máxima em sua saída, sua tensão de alimentação pode ser reduzida, contribuindo na redução do consumo de energia do sistema de transmissão em geral.

Para ter essa reconfigurabilidade na tensão de alimentação do PA, é necessário projetar um circuito capaz de fornecer a corrente que o amplificador precisa operar,

além de fornecer o valor de tensão de cada estágio. Este artigo apresenta o projeto de um driver de corrente controlado digitalmente, que fornece tensões na faixa de 1,1 V a 1,8 V, com passos de 100 mV, capaz de fornecer uma corrente de até 230 mA, implementado na tecnologia CMOS de 130 nm.

## II. ARQUITETURA DE UM PA RECONFIGURÁVEL

O foco deste artigo é a aplicação do circuito proposto em PAs com tensão de alimentação reconfigurável. O PA apresentado em [3] foi utilizado para validar o circuito mostrado neste artigo. O PA descrito em [3] tem sua impedância de saída e sua tensão de alimentação reconfiguráveis, trabalhando em diferentes modos de operação, definidos por 4 bits que mudam o modo de operação de acordo com a necessidade de potência de saída e o casamento de impedância do sistema. A reconfigurabilidade visa reduzir o consumo de energia do amplificador, uma vez que cada modo de operação foi projetado para ser o mais eficiente para uma determinada condição de operação.

Este PA tem sua impedância de saída alterada automaticamente com a troca do modo de operação, mas sua tensão de alimentação teria que ser alternada manualmente ao mesmo tempo em que o sinal digital muda o modo de operação. Procurando por uma solução integrada, este trabalho apresenta uma solução para a reconfigurabilidade de potência. A Figura 1 mostra um diagrama de blocos do PA reconfigurável usado, onde o circuito proposto permite a configuração da tensão de alimentação do amplificador usando um controle digital.

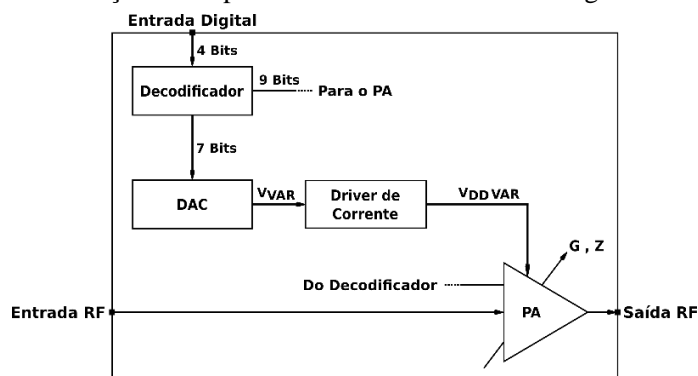


Fig. 1. Diagrama de blocos do circuito aplicado em um amplificador de potência.

O decodificador integrado no chip receberá os 4 bits que definem o modo de operação do amplificador. O decodificador fornece um sinal digital para o PA, que reconfigurará a sua impedância de saída e o seu estágio de potência, e outro sinal para o conversor digital-analógico (DAC), que o converterá para um valor de tensão analógica, que será a entrada do driver de corrente. O driver de corrente fornecerá de forma estável a tensão de alimentação do PA, com a capacidade de fornecer a corrente necessária para um determinado modo de operação. Dessa forma, é possível reconfigurar a tensão de alimentação, o estágio de potência e a impedância de saída do PA, de forma automática, usando apenas um sinal digital.

### III. DESIGN DO DRIVER DE CORRENTE

O projeto do circuito proposto foi baseado em [4], consistindo em dois estágios. O primeiro estágio é um amplificador operacional que tem a função de garantir uma tensão estável para controlar a saída do driver de corrente, garantindo a polarização do estágio de potência e bloqueando possíveis ruídos que desestabilizarão a tensão de saída. O segundo estágio é o driver de corrente em si, que fornecerá a corrente necessária para a correta operação do PA. Todos os transistores foram dimensionados pelo autor, utilizando Simulador Cadence Spectre para verificar a região de operação apropriada.

#### A. Amplificador operacional

O amplificador operacional representado na figura 2 tem uma topologia de dois estágios, usando espelhos de corrente cascode para auto-polarização. O capacitor na saída assegura um sinal estável para controlar o próximo estágio.

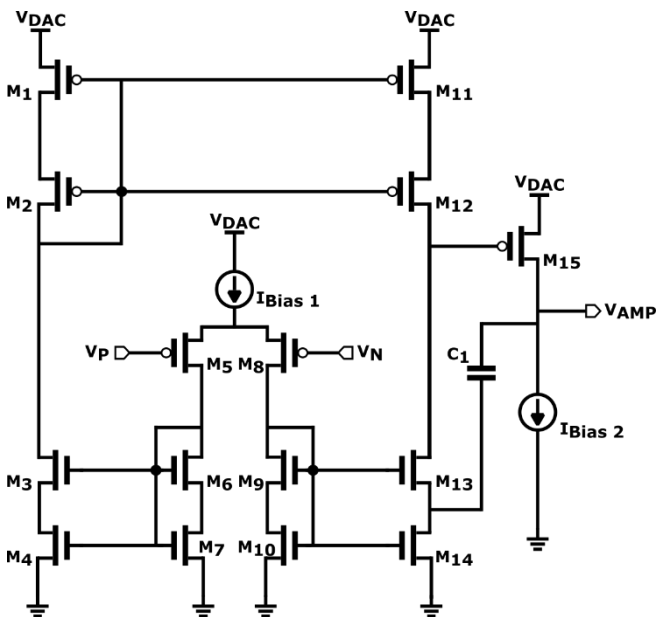


Fig. 2. Esquemático do Amplificador Operacional.

$M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ ,  $M_6$ ,  $M_7$ ,  $M_9$ ,  $M_{10}$ ,  $M_{13}$  e  $M_{14}$  foram dimensionados para operar como espelhos de corrente cascode, dos quais os transistores  $M_2$ ,  $M_{12}$ ,  $M_3$ ,  $M_6$ ,  $M_9$  e  $M_{13}$  foram dimensionados para operar em inversão fraca, enquanto  $M_1$ ,  $M_{11}$ ,  $M_4$ ,  $M_7$ ,  $M_{10}$  e  $M_{14}$  operam na saturação.

Este amplificador é uma solução de baixo custo energético para garantir que o transistor  $M_{20}$  (Fig. 3) possua uma tensão estável em sua porta, uma vez que uma leve variação nessa tensão induz uma mudança considerável na operação do circuito, resultando em uma grande queda do no valor do  $V_{DD}$ .

#### B. Driver de corrente

O driver de corrente funciona baseado em uma configuração super seguidor de fonte, definida pelos transistores  $M_{18}$  e  $M_{19}$ , tendo o transistor  $M_{17}$  como fonte de corrente para o seguidor e  $M_{20}$  atuando como um amplificador de porta comum [5]. Esse estágio foi projetado para ter uma baixa impedância de saída, buscando interferir o mínimo possível com a rede reconfigurável de impedância de saída. Este estágio é composto por 22 células paralelas do circuito descrito, a fim de multiplicar a corrente o suficiente para atender à demanda do PA. A figura 3 detalha o esquemático da célula individual.

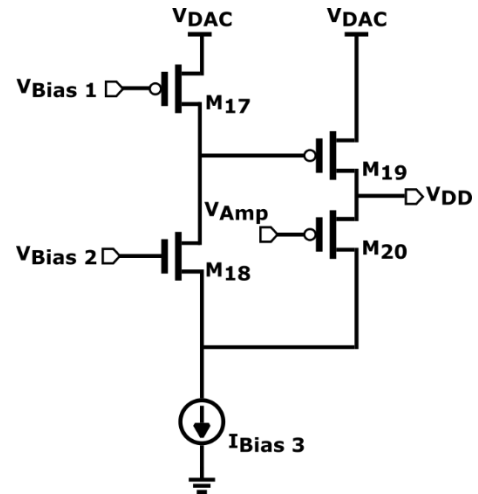


Fig. 3. Esquemático do Driver de Corrente.

Os transistores  $M_{20}$  e  $M_{19}$  foram projetados para ter uma grande largura de canal, podendo assim conduzir uma grande corrente, mas sem sair da região de saturação. A fonte de corrente  $M_{17}$  foi dimensionada para ter a corrente de dreno necessária para polarizar o super seguidor de fonte.

O driver foi dimensionado para operar na condição de maior consumo, com uma tensão de saída de 1,8 V e corrente de 230 mA e, em seguida, foi ajustado para se adequar às outras condições de operação.

#### C. Especificações

A Tabela 1 apresenta todos os modos de operação usados pelo PA de referência [3].

TABELA 1. POTÊNCIA DE SAÍDA DO PA PARA CADA MODO DE OPERAÇÃO

Modo de Operação	V <sub>DD</sub> (V)	I <sub>DC</sub> (mA)	P <sub>DC</sub> (mW)
1	1.8	230	414
2	1.8	188	338
3	1.8	157	283
4	1.7	159	270
5	1.8	133	240
6	1.6	135	216
7	1.5	136	204
8	1.5	119	178
9	1.6	100	160
10	1.4	96	134
11	1.2	99	119
12	1.1	101	111

O valor do V<sub>DD</sub> varia de 1,1 a 1,8 V, em passos de 100 mV, tendo um consumo de energia diferente para cada modo. Note que o PA tem um consumo de energia diferente para modos com o mesmo V<sub>DD</sub>. Isso ocorre como resultado de outras reconfigurações, como impedância de saída variável. As outras reconfigurações não interferem nesta aplicação, uma vez que a função deste circuito é fornecer a tensão de alimentação, entregando a potência necessária, para cada modo. Dessa forma, o circuito foi projetado para atender a essa especificação, podendo fornecer a potência requerida pelo amplificador em cada modo, operando no valor de tensão correspondente.

#### IV. RESULTADOS

A principal motivação deste estudo é aplicar o circuito projetado em amplificadores de potência. Por esse motivo, simulações foram realizadas no esquemático do circuito descrito em [3], usando o simulador Cadence Spectre. Para fins de comparação, o PA foi alimentado por uma fonte de alimentação externa e pelo circuito projetado como fonte de alimentação. Podemos notar ao olhar a tabela 2, que o circuito tem um impacto pequeno no ponto de compressão de 1 dB (OCP<sub>1dB</sub>) e no ganho de potência (S<sub>21</sub>) do PA, com uma diferença média de 0,21 dB e 0,1 dB, respectivamente.

TABELA 2. COMPARANDO OS PARÂMETROS OCP<sub>1dB</sub> E S<sub>21</sub> COM E SEM O DRIVER PARA OS DIFERENTES MODOS DE OPERAÇÃO

Modo de Operação	Com o driver		Sem o driver	
	OCP <sub>1dB</sub> (dBm)	S <sub>21</sub> (dB)	OCP <sub>1dB</sub> (dBm)	S <sub>21</sub> (dB)
1	19.48	28.51	19.52	28.57
2	18.35	27.51	18.47	27.58
3	17.22	26.46	17.38	26.55
4	16.84	26.73	16.99	26.82
5	16.43	26.40	16.66	26.50
6	15.77	26.38	15.96	26.48
7	15.39	26.49	15.56	26.58
8	14.30	24.66	14.54	24.80
9	13.29	24.13	13.69	24.31
10	12.60	24.16	12.91	24.33
11	11.48	23.96	11.74	24.12
12	11.07	23.70	11.30	23.83

A tabela 3 apresenta os valores máximos da eficiência de potência adicionada (PAE) e o consumo de energia (P<sub>DC</sub>) do PA em ambos os casos. É possível perceber que a diferença entre os valores comparados nesta tabela é mais significativa nesses parâmetros do que nos parâmetros OCP<sub>1dB</sub> e S<sub>21</sub>. P<sub>DC</sub> tem uma diferença relativa média de 3,95% enquanto o PAE tem uma diferença relativa média de 8,3%.

TABELA 3. COMPARANDO OS PARÂMETROS PAE E P<sub>DC</sub> COM E SEM O DRIVER PARA OS DIFERENTES MODOS DE OPERAÇÃO

Modo de Operação	Com o driver		Sem o driver	
	PAE (%)	P <sub>DC</sub> (mW)	PAE (%)	P <sub>DC</sub> (mW)
1	23.96	440.70	25.80	413.80
2	22.62	355.66	24.47	337.84
3	20.89	295.88	22.58	283.48
4	20.01	282.31	21.70	269.58
5	20.34	248.86	22.31	239.78
6	19.33	225.18	21.03	216.27
7	18.61	213.07	20.21	204.29
8	16.83	184.65	18.45	177.93
9	15.71	153.03	17.81	159.80
10	14.75	138.23	16.39	133.92
11	12.79	123.09	14.05	118.87
12	12.47	115.43	13.63	111.34

É mais fácil analisar essas informações por meio de gráficos, comparando cada parâmetro do PA com e sem o sistema projetado. Observando a figura 4, pode-se notar a pequena influência que o circuito exerce sobre OCP<sub>1dB</sub>, com sua maior diferença relativa de 0,4 dB no modo de operação 9. Analisando a figura 5, é notável que o circuito tem pouca influência sobre o ganho de potência, tendo uma diferença máxima de 0,18 dB.

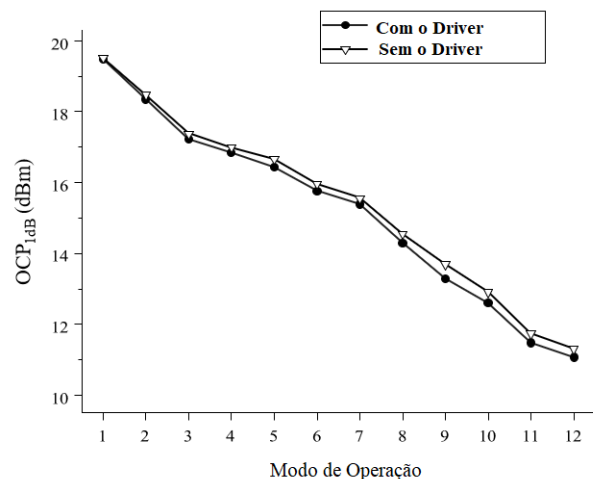


Fig. 4. OCP<sub>1dB</sub> vs modo de operação, com e sem o driver.

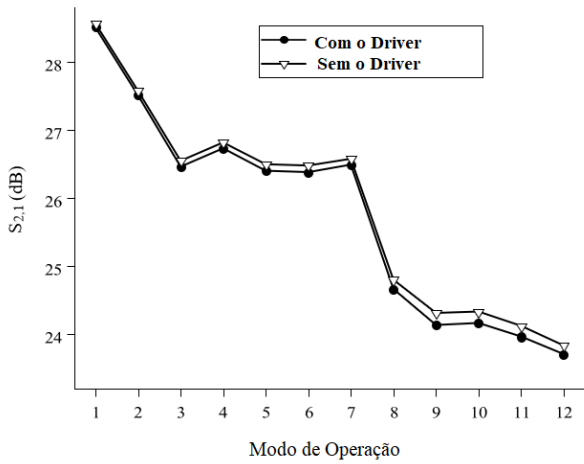


Fig. 5.  $S_{21}$  vs modo de operação, com e sem o driver.

Agora, comparando o PAE com e sem o driver de corrente, analisando a figura 6, é possível observar uma diferença maior entre os valores. Isto acontece devido à influência direta do circuito no consumo de energia do sistema. Para fornecer a corrente exigida pelo PA, o driver possui um certo consumo de potência. Uma comparação do consumo de energia do sistema com e sem o circuito projetado é mostrado na figura 7. A maior diferença relativa no valor do PAE é de 11,79%, ocorrendo no modo de operação 9. Mesmo reduzindo o PAE, o uso de um driver de corrente não é dispensável. O consumo de energia desse sistema é a consequência para se obter uma solução totalmente integrada para PAs reconfiguráveis em tensão.

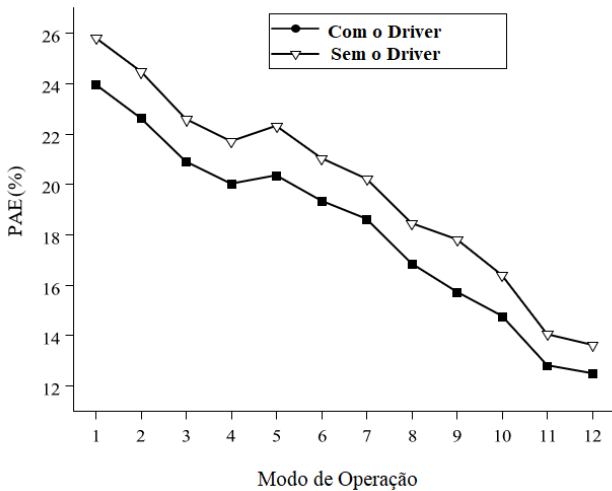


Fig. 6. PAE vs modo de operação, com e sem o driver.

Na Figura 7, é relevante notar que para os modos de menor consumo, a diferença entre as retas diminui. Isso ocorre porque o circuito reduz seu consumo ao passo que a potência demandada pelo PA diminui. Também é importante destacar o pequeno consumo do circuito,

apenas 26,9 mW no modo de maior consumo, o que representa uma diferença relativa de 6,5% em comparação com consumo sem o driver.

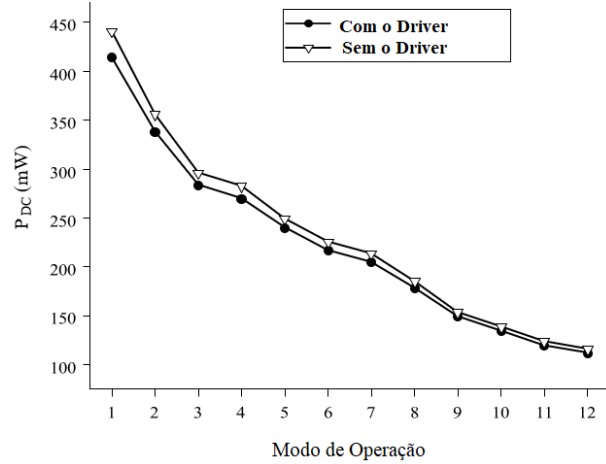


Fig. 7.  $P_{DC}$  vs modo de operação, com e sem o driver.

## V. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta o projeto e discussão de um sistema de alimentação para amplificadores de potência com tensão de alimentação configurável. O driver opera em uma faixa de 1,1 V à 1,8 V, com passos de 100 mV, tendo uma capacidade máxima de corrente de 230 mA. O circuito permite uma solução integrada para alimentar o PA com diferentes níveis de tensão, consumindo apenas 26,9 mW no modo de maior consumo e tendo uma baixa intervenção nos parâmetros do amplificador, apenas 0,18 dB de diferença no ganho de potência, 0,4 dB no ponto de compressão de 1 dB e 11,79% em PAE, para o pior caso.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Lucero, "IoT platforms: enabling the Internet of Things." IHS Markit. March, 2016.
- [2] A. Y. Wang, C. G. Sodini, "On the Energy Efficiency of Wireless Transceivers," IEEE International Conference on Communications, Istanbul, 2006.
- [3] F. Santos, J. Pereira, B. Leite, A. A. Mariano, "Reconfigurable CMOS power amplifier for efficiency improvement," Simpósio Sul de Microeletrônica (SIM), Curitiba, 2018.
- [4] A. D. Souza, S. Bampi, "Design of a Capacitorless Low-Dropout Voltage Regulator with Fast Load Regulation in 130nm CMOS," 19th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 2012.
- [5] P. Hazucha, et al, "Area-Efficient Linear Regulator With Ultra-Fast Load Regulation." IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2005: Vol.40, No.4.