

PROJETO SUPERMOUSE - PARTE 1

Transmissor de AM classe E modulado por fonte chaveada



Para quem não é dessa época, o personagem aí é de um antigo desenho animado, um ratinho pequeno mas forte pra caramba que dava surras homéricas em enormes gatos.

Dado o recente interesse que o pessoal tem demonstrado por montagens AM baseadas em transistores MOSFET baratos, e mesmo já existindo alguns bons projetos na Internet, resolvi dar minha contribuição propondo um transmissor de AM pequeno e leve mas com uns 100W de portadora, porque a vida é muito curta para QRP!

A ideia é ter um “bloco de potência” contendo amplificador de RF e fonte, em torno do qual os colegas possam montar seu transmissor anexando VFO, dial, sintonia de antena, medidores, tratamento de áudio, gabinete e até construir um multibanda.

A descrição a seguir não entra na parte construtiva, porque o protótipo ainda está no estágio de “aranha”, montado ponto-a-ponto sobre uma placa de circuito impresso. Assim que estiver pronta a placa final, publicarei as instruções de montagem, e depois, caso haja interesse, uma descrição dos cálculos e programas de computador utilizados.

O projeto parte das seguintes premissas:

- 1- Bom desempenho: Cobertura da parte AM das faixas, com 100% de modulação e sem distorções e espúrios, em conformidade com as exigências da Anatel.
- 2- Disponibilidade de peças: Nada de peças difíceis de obter ou de construir, sempre que possível “acháveis” na Santa Ifigênia ou pela Internet.
- 3- Facilidade de montagem: Circuito impresso, componentes normais, caixa padrão, sem ajustes que necessitem instrumentos sofisticados ou grandes conhecimentos de eletrônica.
- 4- Alta eficiência: além de ecologicamente correto, este item permite a dispensa de dissipadores e ventiladores, diminuindo tamanho e peso e contribuindo para o item seguinte;
- 5- Baixo custo: Ninguém gosta de meter a mão no bolso;

- 6- Opção para 80, 40 e talvez 20 metros. O estágio de potência RF poderá ser replicado para cobrir mais bandas, sendo comutado por inteiro. Mas o aparelho monobanda pode ser botado no ar sem mais nada além de um cristal de quartzo, microfone e antena.

Alguns desses itens demandam solução de compromisso: Não se pode ter simplicidade extrema, custo baixo, desempenho ótimo e um monte de recursos, tudo ao mesmo tempo. Escolhi um meio termo, e procurei manter as premissas acima utilizando um número razoável de peças e circuitos, inicialmente apenas para a faixa de 40 metros.

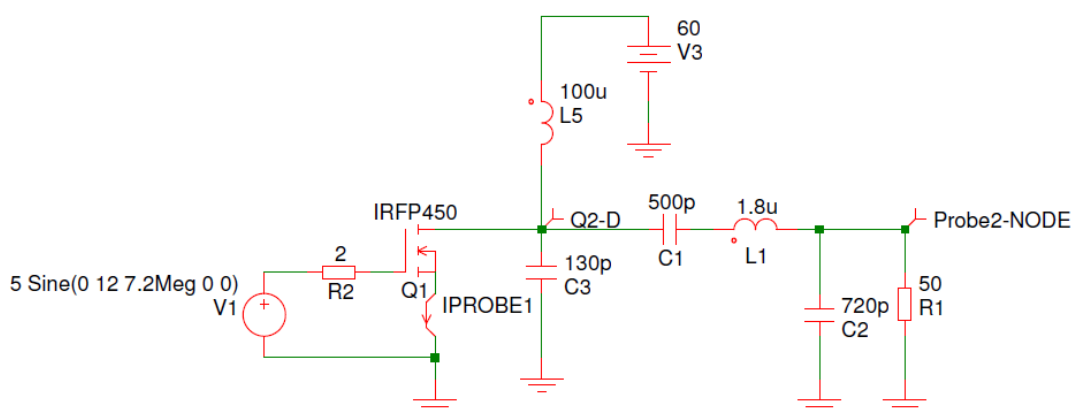
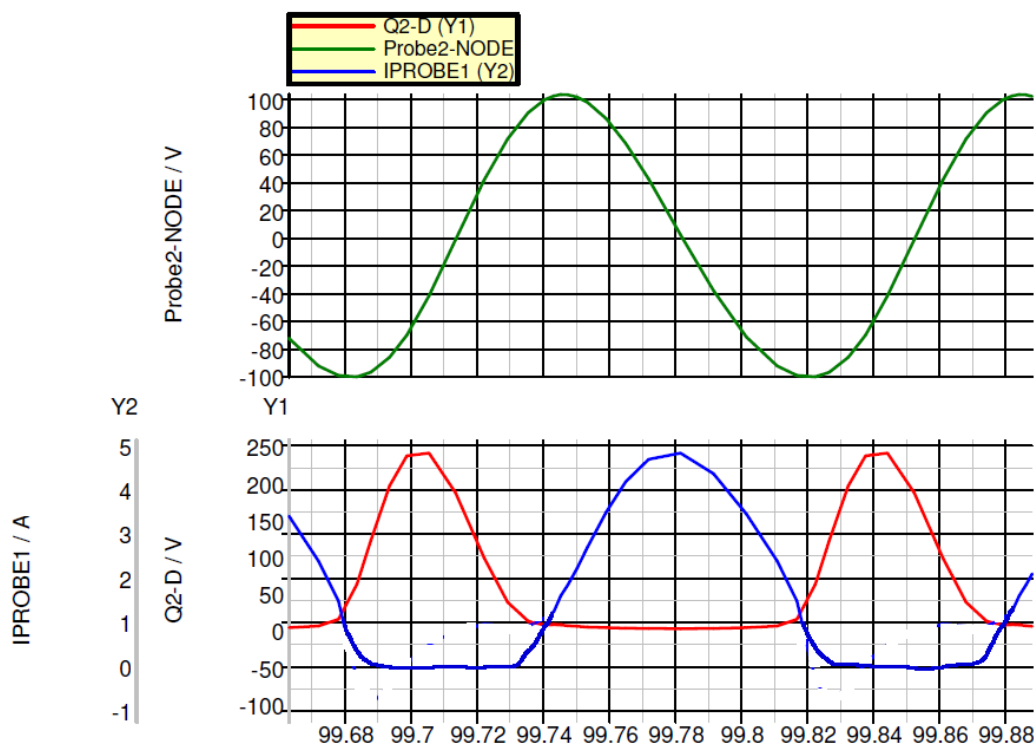
A CONFIGURAÇÃO EM CLASSE E

Patenteada em 1975 por Nathan Sokal, um engenheiro e professor do MIT que também é radioamador, é mais um modo de sintonizar amplificadores do que propriamente uma configuração, já que o circuito é o mesmo empregado em outras classes de funcionamento.

O objetivo da sintonia em classe E é obter as formas de onda que resultem na maior eficiência possível (ou rendimento, que é a relação entre potência de saída RF e a potência DC consumida), utilizando um dispositivo que opere como chave e circuitos ressonantes. A corrente e a tensão no dispositivo nunca devem ocorrer simultaneamente, ou seja, quando o transistor está saturado não há tensão através dele e quando está aberto não há corrente, e a transição entre um estado e outro deve ser feita de modo a manter a dissipação mínima. O circuito é ressonante série numa frequência acima da frequência de trabalho, de forma que o pulso semi-senoidal de tensão ocorre inteiramente durante o período de corte do transistor: quando começa a conduzir a tensão sobre ele já é zero.

Outras classes de funcionamento também procuram obter esse efeito, mas a grande sacada da classe E é que as capacitâncias e indutâncias parasitas inerentes aos circuitos e transistores são absorvidas e aproveitadas em benefício do rendimento, ajudando em vez de atrapalhar. Teoricamente seria possível obter eficiência de 100%, mas sempre existe a resistência de condução do transistor e outras perdas que acabam limitando a eficiência real entre 85 e 95%, mesmo assim bastante alta.

Neste link tem um artigo do próprio Nathan para quem quiser ir a fundo:
<http://www.electro-tech-online.com/custompdfs/2011/09/010102qex009.pdf>



Simulação do estágio de RF : Observe a tensão e a corrente não simultâneas.

Um amplificador classe E não é linear, significando que a sua saída não varia proporcionalmente com a entrada. Portanto, se você quiser manter a alta eficiência e obter boa qualidade de áudio, há que modulá-lo em alto nível, variando a tensão de alimentação. Descartei o modulador mais fonte convencional com transformadores, devido ao custo e o peso.

Para obter a tensão modulada necessária e manter a eficiência global do projeto, optei por retificar diretamente a rede de 110v e aplicar a tensão DC num regula-

dor/modulador chaveado do tipo série, que é mais simples e eficiente do que os “switchers” em ponte ou push pull usando transformadores.

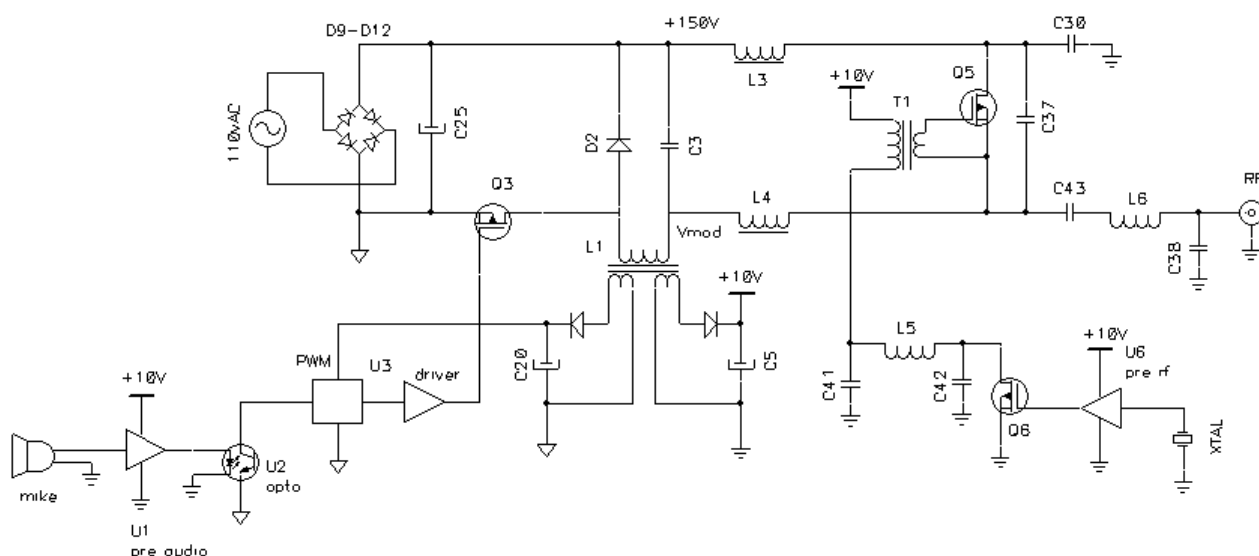


Diagrama simplificado

Embora não exista aí nada de novo, foram adotadas algumas soluções meio in-comuns que merecem uma explicação mais detalhada. O diagrama acima mostra apenas os componentes principais para facilitar o entendimento:

A tensão da rede é retificada por D9 a D12, produzindo cerca de 150Vdc sobre o capacitor C3.

O controlador U3 produz um sinal retangular de 50KHz cujo “duty cycle” (proporção entre o tempo ligado e a duração total do pulso) varia conforme o áudio proveniente do microfone e amplificado por U1, e o aplica ao gate do FET Q3.

Q3 chaveia a tensão de 150vdc da rede retificada sobre o filtro formado por L1, C3, L3 e L4. O filtro elimina a componente de 50KHz e seus harmônicos, deixando passar apenas o DC e o áudio. Como é a tensão negativa que é comutada, a saída do modulador é negativa em relação a +150V. O estágio de potência é modulado pelo *source* do FET, que recebe através do choque L4 a tensão modulada variando entre 0 e -120V em relação ao +150V. Quando sem áudio, a tensão permanece em -60v. O valor da tensão de modulação independe de flutuações da rede elétrica, como veremos depois.

A desvantagem do regulador série é que não dá para isolar a saída em relação à rede elétrica, mas isso foi resolvido isolando-se o circuito por meio do acoplador óptico U2, capacitores C30 e C43 e o transformador T1. Desta forma o modulador e o estágio de potência ficam no potencial da rede, enquanto o chassi, as entradas de microfone e VFO e a saída de RF permanecem isoladas para não haver risco de choques ou curto-circuitos.

O estágio de saída em classe E tem o sinal de RF retirado do source ao invés do dreno, parecendo a primeira vista um seguidor de emissor mas não é (digo, *seguidor de source*, essa nomenclatura de FET é um problema), porque o sinal de excitação continua a ser aplicado entre o gate e o source como no circuito convencional, configuração somente possível graças à isolamento proporcionada por T1.

Essas inversões em relação ao convencional complicam um pouco o conceito mas simplificam bastante o circuito, ao evitar fontes isoladas e transformadores adicionais.

O oscilador U6 aciona o FET Q6, o qual garante sinal suficiente no gate de Q5 para manter a saturação ou corte do mesmo a cada meio ciclo, essencial para o funcionamento em classe E.

As tensões presentes nos enrolamentos secundários de L1 são retificadas para produzir alimentação DC ao CI controlador da fonte, driver de RF e áudio, e neste caso L1 funciona como transformador.

DESCRIÇÃO DETALHADA DOS CIRCUITOS

O esquema completo é analisado a seguir. Ao longo do projeto alguns problemas e melhorias foram surgindo e o circuito final ficou um tanto complicado e fora do padrão, mas creio que a desvantagem disso é na análise do funcionamento, porque o custo de resistores, capacitores e transistores pequenos é irrelevante. E o trabalho de montá-los em placa impressa é até divertido! Se você não se interessar em entender exatamente como funciona a coisa, não há problema, pule os parágrafos mais enrolados e poderá montar, testar e aproveitar o Supermouse do mesmo modo. Para os mais fanáticos, aqui vai:

Oscilador/pré amplificador de RF:

O circuito integrado digital U6 é polarizado na região linear e funciona como amplificador do VFO externo ou como oscilador a cristal, quando este é ligado no conector CN1, e também fornece a excitação para o FET Q6.

O conector CN4 permite dirigir o pré ao módulo de potência local ou externo, no caso de montagens multibanda. O pré não é sintonizado e pode ser usado para qualquer banda.

Driver de RF:

O FET Q6 funciona em classe C dissipando apenas uns 5 watts, e impõe 25Vpp de RF através do transformador T1 no gate de Q5 para garantir a saturação e corte do mesmo. T1 também provê a isolamento entre o estágio final e o driver.

A sintonia é ajustada no centro da faixa esticando ou comprimindo a bobina L5.

A entrada de PTT em CN2 controla a alimentação do pré e a polarização de Q6, assegurando o corte total do amplificador quando não está aterrado, mesmo com a fonte ligada e a tensão Vmod presente.

Estágio final:

Este estágio fornece 100 watts contínuos de portadora, atingindo 400W nos picos de modulação. A sintonia classe E resultou em rendimento da ordem de 90% com o FET IRFP450LC. Para manter a potência razoavelmente constante na faixa de 7100 a

7300kHz , foi utilizado um valor Q do circuito acoplador bastante baixo, igual a 5, mas que ainda garante uma boa atenuação de harmônicos.

O chassi metálico e a saída de RF são isoladas em relação ao estágio final por meio de C36 e C43, que conduzem bem a RF mas tem alta impedância para a frequência da rede elétrica.

Como já vimos, a saída de RF é retirada do source ao invés do dreno, aproveitando-se da isolamento conseguida pelo secundário “flutuante” de T1. Com isso evita-se que o capacitor de isolamento C36 acople o áudio ao chassi, e de quebra cancela a RF no dreno, facilitando a sua isolamento com o dissipador.

A sintonia correta deve ser ajustada por meio da extensão ou compressão da bobina L6 para compensar as variações dos componentes ou quando a antena apresenta SWR maior que 1. Um poste de conexão com aperto manual permite que a bobina seja esticada sem dessoldar, e será mantido na versão final.

Tenha em mente que em classe E não se sintoniza para potência máxima e sim para eficiência máxima! Melhor não tentar “tirar o sangue” do aparelho e manter a potência nominal para a qual foi projetado. Além de perder a eficiência, o classe E fora de sintonia pode gerar harmônicos que distorcem o sinal de modo a indicar potência errada no wattímetro, dando medição de uma potência maior que a real, e ainda transmitir sujeira fora da faixa. Nem todo circuito com um indutor e três capacitores pode ser chamado de classe E. Os valores são críticos, e variam conforme o transistor. A principal característica da classe E é a eficiência, e um amplificador de 100 watts deverá dissipar apenas uns 10, sendo possível resfriá-lo só com a caixa metálica. Se esquentar, desconfie!

Amplificador de áudio:

O operacional U1B fornece o ganho de microfone, ajustado por R7, e U1A funciona como fonte de corrente para o acionamento linear do LED do acoplador óptico U2, que isola o chassi e conectores de entrada/saída em relação ao modulador e estágio final de RF.

O resistor R1 é conectado na entrada do mike para suprir a polarização de microfone de eletreto, e deve ser removido para microfones a cristal ou dinâmicos.

Os capacitores C13, C8 e C10 compõem juntamente com R14, R16, R6 e R13 o filtro passa altos que elimina o excesso de graves, comuns em moduladores que não tem a limitação de graves inerente do transformador de áudio.

Também faz parte do tratamento de áudio o amplificador operacional interno de U3, onde é feita a sobreposição da componente DC da portadora (ajustada por R8) e o áudio proveniente de U2. Mais detalhes de funcionamento do controlador UC3823A podem ser vistos no “data sheet” em <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3823a.pdf>

Fonte moduladora:

A rede de 110v retificada fornece tensão DC em torno de 150 volts, entre +150v e o terra do modulador, representado pelo triângulo vazado. O toroide L2, juntamente com C22 e C27 formam um filtro EMI (eletromagnetic interference) para a fonte não provocar ruídos na recepção.

Como já vimos e embora não pareça à primeira vista no esquema, o FET Q3, o indutor L1 e os capacitores C3 e C7 em paralelo com a carga formam um chaveador série, também chamado “step down” ou “buck”, bastante comum nos conversores DC-

DC de baixa tensão. A diferença é que a tensão negativa é chaveada e não a positiva, de forma que a carga (o estágio de potência de RF) é ligada entre o +150v e Vmod, e a fonte modula o estágio final variando a tensão do source desse estágio. Em relação aos +150v, a tensão do modulador sem áudio é -60v, variando durante os picos de modulação entre zero e -120v.

Para simplificar e evitar instabilidades, não foi utilizada nenhum tipo de realimentação negativa. Em vez disso, Q2, C23 e R19 funcionam como “feedforward”, ou “realimentação para a frente”, que compensa as flutuações de tensão da rede e elimina completamente o “ripple” de 120Hz, alterando a largura do pulso inversamente às essas variações. Desta forma a tensão de portadora ajustada mantém-se constante independente da rede. Também não convém aumentar esse ajuste além dos 60V para obter mais potência, porque pode reduzir a taxa de modulação e distorcer o áudio.

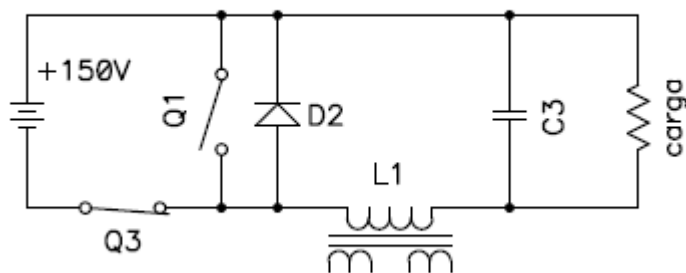
O circuito dispõe de um limitador de pico de modulação: o diodo D4 conduz zerando o ganho do amplificador interno de U3 e limitando o “duty cycle” quando a tensão de modulação atinge -120V. Este circuito previne a destruição do FET Q5 por excesso de tensão: deve-se lembrar que os picos de RF atingem 4 a 5 vezes a tensão de alimentação nos estágios em classe E.

Para atenuar a presença da frequência de chaveamento e seus harmônicos no sinal modulado, temos o filtro passa baixas L-C-L composto por L1, C3 em paralelo com C7 e L3 em série com L4, calculados para banda passante de 8kHz. Note que L4 além de fazer parte do filtro também funciona como choque de RF para o estágio final.

A fonte é auto-alimentada como é padrão nas fontes chaveadas ligadas direto à rede. Os +150V da rede carregam o capacitor C20 por meio de R10 até o controlador U3 começar a chavear. A tensão no secundário de L1 tem seu valor pico-a-pico igual a +150v dividido pela relação de espiras, independente do duty cycle. As tensões de pico positiva e negativa são retificadas e somadas, gerando a alimentação para o controlador U3, que contém o gerador de PWM, o driver do FET e circuitos de proteção. No caso, L1 funciona como transformador, alimentando também a fonte isolada de +10v para os circuitos de driver de RF e áudio. Estas fontes não são reguladas e variam conforme a rede, daí os reguladores lineares U4 e U5.

O enrosco

Esta configuração no entanto apresentou um grave problema: A fonte não dá a partida! A razão é que no regulador chaveado série (ver figura abaixo) quando não há carga, a corrente no indutor L1 é zero. Como esse indutor funciona como transformador para gerar a tensão utilizada pelo o driver de RF, no instante da ligada o estágio final não consome corrente por não haver driver, e não tendo corrente em L1 não há tensão no secundário e assim permanece indefinidamente, C3 carregado com 150v, sem chaveamento nem corrente em L1. A solução foi acrescentar o transistor Q1, que satura quando Q3 corta mantendo assim os pulsos de 50kHz em L1 e garantindo a alimentação para o driver de RF mesmo sem carga, e aí a fonte parte normalmente. Um benefício extra deste truque é que a fonte permanece operacional todo o tempo e a tensão de +10v poderá ser utilizada externamente para alimentar o VFO e outros acessórios, com a ressalva de que não é regulada.



Regulador chaveado série modificado

O protótipo aranha:

O método de montar as peças em cima de uma placa de CI com as perninhas pra cima fica feio e dá um trabalhão, mas é ótimo para modificar durante os testes e melhor ainda no desempenho, porque a placa é um perfeito plano de terra, difícil de conseguir com qualquer outro tipo de montagem provisória.

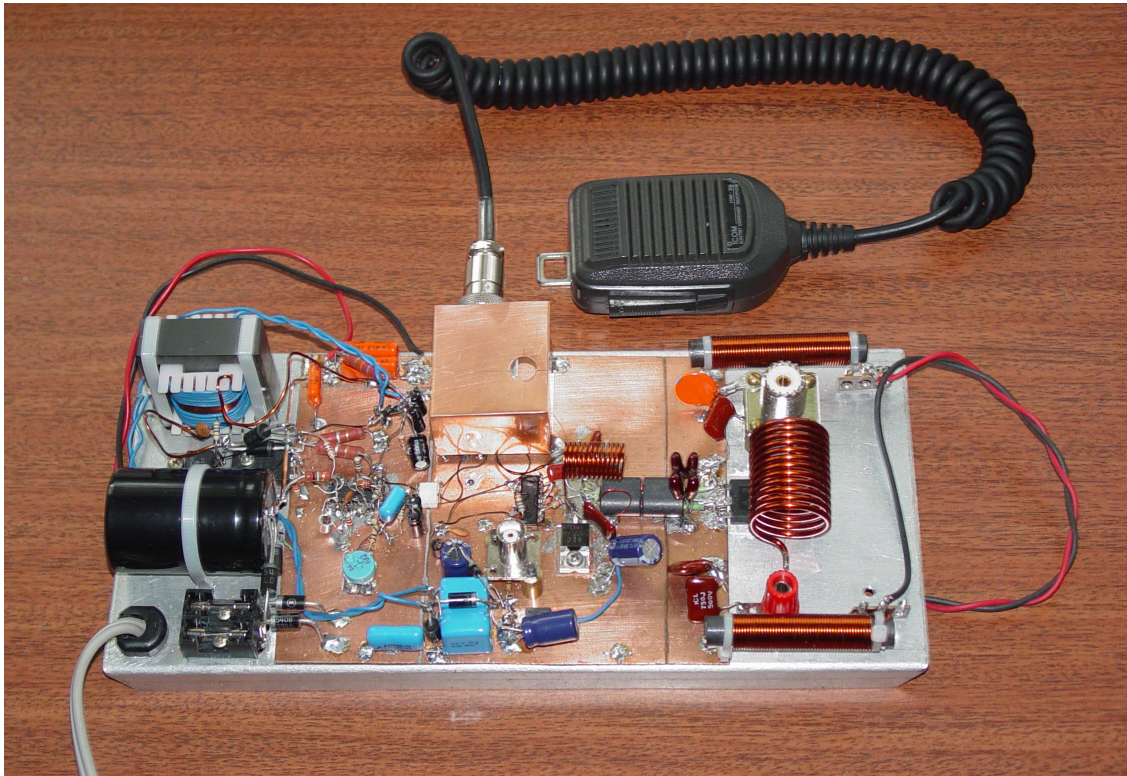
A gambiarra aí na foto não se parece nem um pouco com o transmissor final, que será mais compacto e prático, em caixa fechada e com os conectores no lugar certo.

Houve necessidade de blindagem para os circuitos de áudio, que talvez possa ser dispensada no modelo final, devido à melhor distribuição no layout e menor interferência elétrica nas montagens SMD.

Utilizei nos testes um gerador de sinais HP8640B como VFO, mas poderia ser qualquer cristal na faixa de AM ou um VFO externo, sintetizado ou não. O microfone é um handmike de eletreto que vem com o rádio IC746pro, sem nenhum tratamento de áudio.

Depois de meia hora ligado com portadora, a temperatura do chassi não ultrapassa 50 graus, sem nenhum tipo de ventilação. A capacidade de dissipação (área de metal exposta) do protótipo é bem inferior a da caixa final, o que dá a garantia de que funcionando com essa, funcionará melhor com a outra.

Se alguém se dispuser a encarar já a montagem, pode mandar bala, mas aconselho esperar a placa final. O formato do protótipo aranha é muito ruim para o uso no shack, e qualquer outro tipo de montagem provavelmente não funcionará a contento.



Conclusão:

É ainda um pouco cedo para concluir, mas o Supermouse promete ser uma opção interessante para quem não quer ter muito trabalho e também para quem gosta de fazer montagens bonitas e sofisticadas, nesse caso usando o projeto como bloco básico.

A alta eficiência, resultando em pequeno tamanho e peso é a principal qualidade do bichinho, que apresenta também força considerável e um bom áudio, de acordo com o monitoramento local e pelas reportagens dos colegas.

As medições demonstram estar tudo de acordo com o figurino, conforme as especificações abaixo. É interessante que mesmo sem ter realimentação, a linearidade do modulador é muito boa: os produtos de intermodulação para áudio senoidal de 1kHz ficaram abaixo de -30dB em relação a portadora e laterais. E mesmo forçando o ganho de microfone (como de hábito no AM), o filtro do modulador impede o espalhamento e “arredonda” o áudio, atuando como compressor. Creio que ainda pode melhorar com uma boa equalização, já que a resposta é plana. Mas isso depende também do microfone e deve ser resolvido externamente.

Futuras versões, além das bandas de 80 e 20m, poderão ter mais potência, empregando transistores melhores. É possível também se pensar numa versão para rede elétrica de 220V.

Para as montagens multibanda, uma boa seria produzir outro módulo contendo os estágios finais para 80 e 20 metros, trabalhando em conjunto e utilizando a mesma fonte, áudio e pré de RF do módulo de 40m.

Especificações do protótipo:

Cobertura:	7100 a 7300kHz
Impedância de saída nominal:	50ohm
SWR:	1,5:1 para + - 3dB de RF
Potência de portadora:	100w
PEP:	400w
Entrada RF:	0 dBm (1mW)
Rendimento do estágio final de RF:	90%
Alimentação:	110vAC, -10% +30%
Resposta de áudio -3dB:	200 – 8.000 Hz
Atenuação de 2º harmônico:	-30dB
Atenuação de 50kHz:	-50dB
IMD:	-30dB
Dimensões:	27x12x6cm
Peso:	0,8kg

Próximo passo: A montagem final

O Supermouse será montado em uma caixa padrão de alumínio medindo 18 x 12 x 8cm vendida na Internet pela Radiolar, utilizando placa de circuito impresso, componentes SMD e também do tipo convencional, segundo a conveniência de layout e montagem *versus* facilidade de obtenção.

A placa poderá ser fabricada pelo processo do “ferro de passar roupa”, transferindo-se uma impressão a laser do papel para o cobre depois corroído em percloroeto, ou talvez produzida industrialmente e vendida a preço de custo para os colegas.

Externamente à caixa haverá apenas a entrada de força, chave geral e os conectores de entrada/saída de RF e de microfone. Espero que caiba! Se não der, vamos para uma caixa um pouco maior.

Qualquer dúvida ou sugestão estou no email sauloquaggio@gmail.com