UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO

# CONSOLE DE MIXAGEM DE ÁUDIO CONTROLADA REMOTAMENTE

Autor: _____
Leonardo Duzzi de Lima

Orientador: _____
Prof. Fernando Antônio Pinto Barúqui

Examinador: _____
Prof. Antonio Petraglia

Examinador: _____
Prof. Joarez Bastos Monteiro

DEL
Abril de 2006

**Dedicatória:** Dedico este trabalho aos meus pais, que nesses anos todos de minha formação sempre me apoiaram e me deram todos os recursos para que eu pudesse estar aqui hoje, apresentando este trabalho e concluindo minha graduação.

**Agradecimentos**: Agradeço ao Professor Baruqui por toda atenção dedicada a este trabalho, e também por acreditar que este pudesse ser realizado. Agradeço ao Paulo Gentil e ao Professor Casé, pela ajuda com os componentes SMD, além do Laboratório PADS pelo uso do Analisador de Espectro. Agradeço também aos meus amigos do Fórum Audiolist (www.audiolist.com.br) que muito me ajudaram na busca de soluções e esclarecimentos sobre este tipo de equipamento. À minha namorada Uend, que aturou meu mau humor nos dias em que nada funcionava.

**Resumo**: Este trabalho foi fruto da necessidade de um equipamento inexistente no mercado, capaz de dar a liberdade ao operador de som de mixar dois instrumentos à distância. Depois de quase um ano e meio de trabalho, consegui projetar e montar uma console de áudio com essa característica de flexibilidade, e com qualidade suficiente para ser empregada em eventos profissionais de sonorização, além de poder ser expandida a quantos canais de áudio forem necessários em vista da arquitetura utilizada.

**Palavras-Chave:** Equalização de áudio, controle remoto, mixagem.

# Índice:

Dedicatória.....II
Agradecimentos.....III
Resumo.....IV
Palavras-Chave.....V
Índice.....VI
1 - Introdução.....1
2 - Diagrama de Blocos..... 3
2.1 - Controle de Ganho.....4
2.2 - Etapa de Equalização.....5
2.3 - Controle de Volume do Canal e Mandada Auxiliar.....6
2.4 - Somador de Sinais e Controle do Volume de Saída.....6
3 - Projeto dos componentes e resultados simulados.....7
3.1 - Controle de Ganho.....8
3.2 - Etapa de Equalização.....12
3.3 - Controle de Volume do Canal e Mandada Auxiliar.....18
3.4 - Somador de Sinais e Controle do Volume de Saída.....19
4 - Resultados Experimentais.....21
5 - Controle Remoto e sistemas de controle.....28
5.1 - Transmissor do Controle Remoto.....28
5.2 - Receptor do Controle Remoto e interface de comando.....30
6 - Conclusão.....34
7 - Referência Bibliográfica.....35
8 - Bibliografia Complementar.....36

# 1 - Introdução

Este trabalho tem o objetivo de expor os meios e métodos de desenvolvimento de uma console de mixagem de áudio controlada remotamente. Vale ressaltar que este equipamento ainda não existe para ser vendido comercialmente.

A idéia deste projeto surgiu com as dificuldades encontradas em meus trabalhos como técnico de som. Muitos dos trabalhos que realizo são em clubes e igrejas, onde nem sempre a console de mixagem pode ficar em local adequado para que se realize uma boa mixagem, com isso, surgiu a idéia de projetar dois canais de uma console de mixagem que pudessem ser controlados remotamente, e assim, facilitando a operação do equipamento.

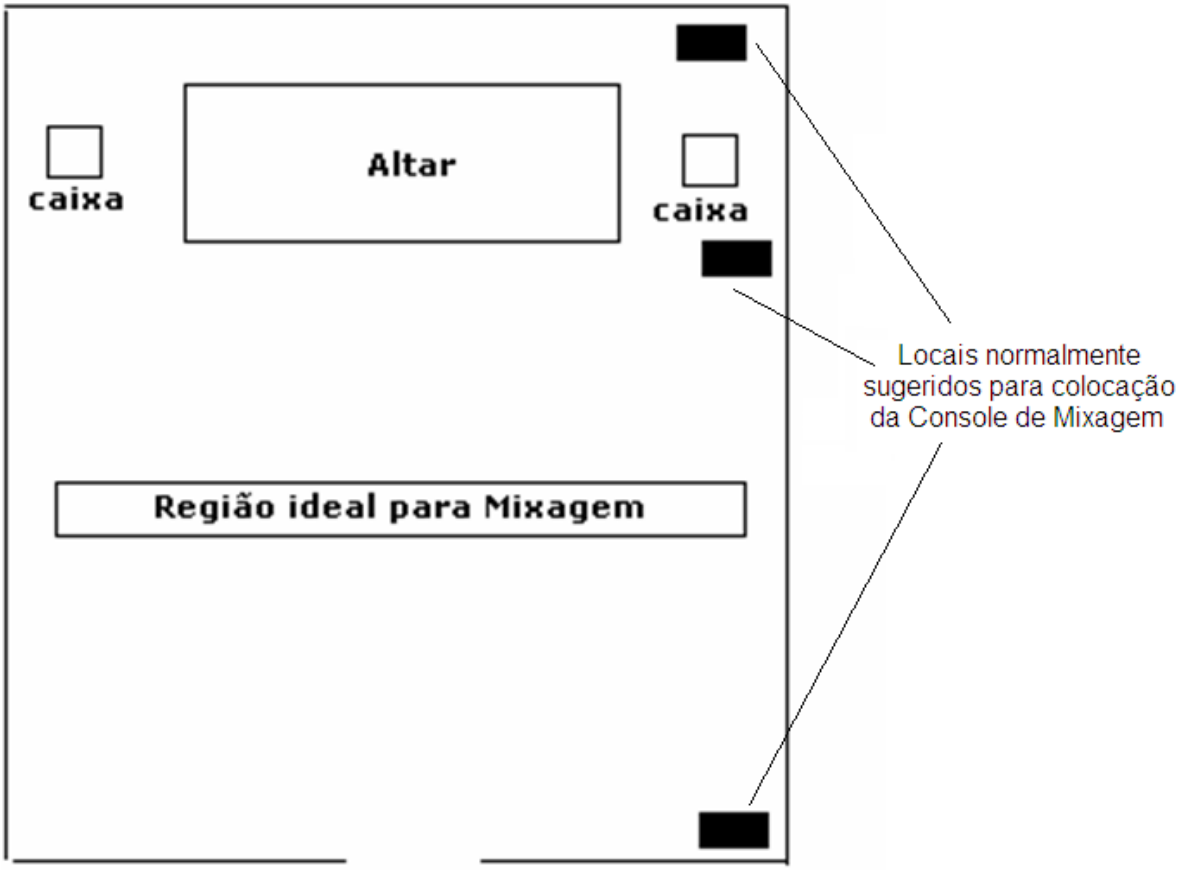


Figura 1: Esquema de localização típica da console em uma Igreja

A Figura 1 demonstra uma dificuldade típica que encontro em meus trabalhos. Nela podemos ver os locais onde normalmente os operadores de som são obrigados a colocar a console. Como também podemos ver, a região ideal para mixagem fica bem distante dos pontos “sugeridos” dificultando muito o trabalho do operador.

O uso deste equipamento não se restringe apenas à aplicação citada acima, ele também teria muita utilidade substituindo as mesas convencionais de mixagem de PA (conjunto de equipamentos utilizado para distribuir som ao público) nos Trios Elétricos, além das Consoles de mixagem de palco em todos os tipos de evento, pois nestes casos, o operador de som tem que escutar cada monitor individualmente e realizar a mixagem para cada um, e este servir como retorno para o músico em questão.

O projeto se iniciou com uma extensa pesquisa sobre os componentes eletrônicos dos quais eu tinha certeza que utilizaria, tais como: Amplificadores Operacionais, Potenciômetros Controlados Digitalmente, Transmissor e Receptor de RF e Componentes Lógicos (*Encoders, Decoders,* etc). Os Potenciômetros Controlados Digitalmente foram os mais difíceis de adquirir, pois poucos fabricantes comercializam este tipo de componente, além de nenhum ser importado para o Brasil. Felizmente, depois de muita pesquisa, optei pelo modelo AD5228 da Analog Devices, que também me forneceu amostras grátis que foram utilizadas no projeto.

A parte mais crítica de uma console de áudio são os Filtros Equalizadores [1], por isso, dediquei bastante tempo em pesquisas para escolher a melhor topologia, e acabei optando por uma topologia bastante parecida com o modelo de Baxandall [2] para filtros com três bandas de Equalização, mas o modelo utilizado sofreu algumas alterações, tais como, a Inclusão de controle da freqüência de atuação do filtro de médios, e mais adiante com testes práticos fui alterando os componentes de acordo com os resultados sônicos que desejava.

Os custos do projeto foram bancados por mim, mas alguns componentes foram cedidos pela Texas Instruments e pela Analog Devices, mas não possuo números exatos do custo total, ficando uma estimativa em torno de Quatrocentos Reais.

Nos próximos capítulos será demonstrado detalhadamente o projeto de cada bloco da console, com cálculos, simulações e resultados práticos. Também será feita uma discussão baseada nos parâmetros técnicos da console e comparação com alguns equipamentos comerciais, além de uma avaliação subjetiva dos

resultados auditivos levantados por mim. Por último, apresentarei os trabalhos futuros para melhoria do projeto e uma conclusão.

## 2- Diagrama de Blocos

Este capítulo será dedicado à apresentação e breve explicação de cada bloco da parte analógica da console. Maiores esclarecimentos de cada componente serão dados no próximo capítulo, onde todo o projeto será detalhado. Na Figura 1.1 é mostrado o diagrama completo da console.

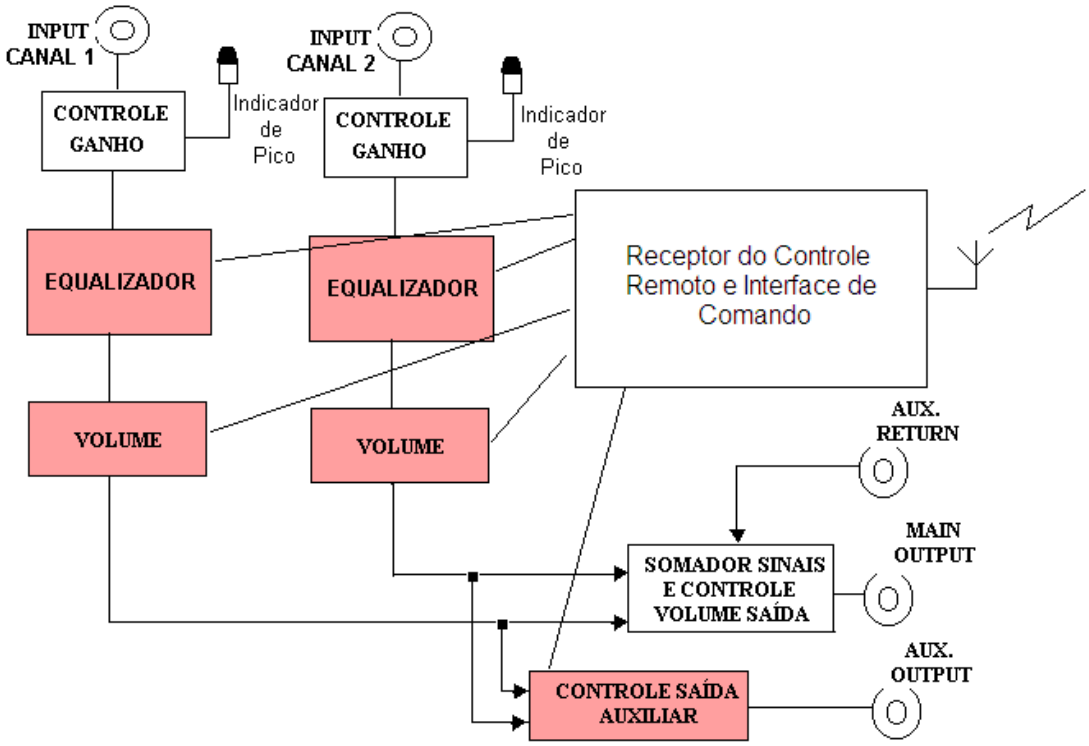


Figura 1.1: Diagrama de blocos da console.

Como podemos ver na Figura 1.1, a console é formada por dois canais mono idênticos, além de alguns blocos de controle geral comuns aos dois canais. Os blocos destacados são controlados remotamente.

Cada canal possui sete controles básicos, onde cinco destes serão controlados remotamente, ficando apenas o potenciômetro que controla o ganho do sinal de entrada, e o potenciômetro que controla a banda de atuação do filtro de médios fixos no corpo da console.

Os cinco parâmetros controlados remotamente são:

1. Controle de Graves com filtro do tipo *Shelving**.

2. Controle de Médios com filtro semi-paremétrico do tipo *Peaking*** (200Hz – 6KHz).
3. Controle de Agudos com filtro do tipo *Shelving**.
4. Controle de nível da saída auxiliar do tipo *pós-fader,* para que se possa enviar o sinal do canal a um processador de efeitos externo.
5. Controle de volume do canal (*fader*) que determinará a quantidade de sinal que irá para a saída principal da console.

**tipo de filtro com a capacidade de aumentar ou diminuir uma faixa de freqüências dentro de uma banda específica, seu formato é parecido com um filtro passa-faixa.*
***tipo de filtro em que uma dada freqüência determina o ponto em que todas as freqüências acima ou abaixo dela serão acentuadas ou atenuadas,*

Abaixo será explicado sucintamente cada um dos blocos que compõem a console.

## 2.1 – Controle de Ganho

Este bloco é responsável pela pré-amplificação do sinal que chega à console, proveniente das mais diversas fontes sonoras: Microfones, Captadores, Sintetizadores [3], etc.

Esta etapa possui entrada desbalanceada, com ganho máximo de 32,6dB, e ganho mínimo de 0dB, sendo o controle deste parâmetro feito por um Potenciômetro Analógico, Rotativo e Linear, fixado no corpo da console. A opção de manter este controle fixo no corpo da console se deu por dois motivos: o primeiro é baseado no fato de que o operador necessita ver o Led indicador de saturação de sinal (também fixado no corpo da console), para poder ajustar o nível ótimo de sinal que será enviado às próximas etapas de processamento; o segundo motivo se baseia nos níveis de ruído encontrados nos potenciômetro digitais, justificando assim o uso de um potenciômetro analógico, já que nessa etapa o ruído é o grande vilão.

A impedância de entrada [1] ficou estabelecida em 22KΩ, pois é este o valor encontrado na maioria dos equipamentos profissionais, sendo esta adequada à

maioria das fontes geradoras de som: microfones, sintetizadores, etc. Foi implementado também um filtro passa-altas [1] logo na entrada de sinal com $f_{-3dB}$=10Hz, para evitar problemas de acoplamentos às fontes sonoras com nível DC na saída.

O circuito de detecção de saturação de sinal tem a função de amostrar o sinal na saída da etapa de ganho, e acionar um Led quando este sinal ultrapassar 400mV ou ficar abaixo de – 400mV, evitando assim que este sinal sofra distorção nas etapas seguintes, e ajudando também a ajustar o nível ótimo do sinal, maximizando a relação sinal ruído. A escolha destes valores em ±400mV é um compromisso entre o nível de ruído e a distorção harmônica [4] gerada nas próximas etapas de processamento, e será melhor detalhado nos próximos capítulos. Este valor também está dentro da faixa de valores encontrados para o nível de sinal da maioria dos equipamentos profissionais, geralmente entre –10dBV (316mV) e 0dBV (707mv). O conector utilizado na entrada do canal é do tipo P10 fêmea.

## 2.2 – Etapa de Equalização

Na prática, os Engenheiros de som tem o costume de dizer que os equalizadores paramétricos e semi-paramétricos têm a função de “timbrar” o instrumento [3], isso porque o equalizador dá ao operador a oportunidade de variar o ganho das diversas freqüências que formam o espectro sonoro daquele instrumento (fundamentais e harmônicos). Nas consoles mais elaboradas, e também mais caras (algumas chegam a custar centenas de milhares de dólares) o equalizador do canal pode atuar em até cinco bandas diferentes: graves (20 - 200Hz), médio-graves (200 - 800Hz), médios (800 - 3500Hz), médio-agudos (3,5 - 6,5KHz) e agudos (6,5 - 20KHz), sendo as duas primeiras com filtro do tipo *Shelving*, e as outras do tipo *Peaking*. Estes controles de tonalidade também possuem regulagem do fator de qualidade (“Q” do filtro) e banda de atuação, disponibilizando assim, muitos recursos para o operador “timbrar” o instrumento da forma que desejar.

O equalizador em questão é do tipo semi-paramétrico de três seções, com filtros do tipo *Shelving* fixos para os graves e agudos, e filtro do tipo *Peaking* para o controle dos médios, com banda de atuação ajustável entre 190Hz – 6KHz, e fator

de qualidade em toda a banda de atuação de 1,4 nos níveis de ganho e atenuação máximos. Os filtros de graves e agudos podem variar seus ganhos em ±15dB (20Hz) e ± 15dB (20Khz) respectivamente, com uma curva do tipo *shelvinging*.

Como citado anteriormente, o potenciômetro que controla a freqüência de atuação do filtro dos médios foi fixado no corpo da console por ser do tipo Duplo, Log-Reverso [2], ficando muito difícil implementar seu controle remotamente. Os outros seis controles do equalizador (ganho e atenuação de cada seção) são controlados remotamente através de seis botões (3 *Up* e 3 *Down*) e terão seus funcionamentos explicados mais adiante.

## 2.3 – Controle de Volume do Canal e Mandada Auxiliar

Estes dois controles têm a função de dosar a quantidade de sinal que será encaminhado às saídas da console (*Main Output* e *Auxiliar Output*). Esses controles também são controlados remotamente, e não possuem função de ganho, apenas atenuam o sinal que passa por eles. O controle de volume envia todo o sinal processado pelo canal à saída principal da console, para que este seja somado com o outro canal, e ao mesmo tempo fornece este mesmo sinal enviado à saída da console ao controle de Mandada Auxiliar, que fica responsável por enviar o sinal do canal a um processador de efeitos externo, como: *Reverb, Delay, Chorus*, etc [3].

## 2.4 – Somador de Sinais e Controle do Volume de Saída

Este bloco tem a função de somar o sinal proveniente dos dois canais da console com a volta do sinal enviado pela mandada auxiliar para ser processado externamente. Como os equipamentos profissionais que comumente são utilizados logo após as consoles (Equalizadores, *Crossovers* e Amplificadores) [3] exigem um nível de sinal de entrada em torno de 1V para poderem operar corretamente, ou entregar a máxima potência no caso dos amplificadores, este somador foi projetado com um ganho de aproximadamente 21dB, e com um controle passivo de volume (-∞ até 0dB), a fim de poder ser controlado para se conseguir o nível desejado na saída principal da console.

## 3 – Projeto dos componentes e resultados simulados

A parte analógica da console foi toda alimentada por uma fonte de tensão simétrica de ±12Vdc. Estes valores foram escolhidos tendo em vista a faixa de operação dos amplificadores operacionais [5], que trabalham numa tensão máxima de ±18V. Esta tensão foi fornecida por uma fonte de alimentação cujo transformador possui *tap* central e relação 127V~15V/1Arms, que equivale a 21,15 Vdc de saída, suficientes para alimentar os reguladores de tensão 7812 e 7912, capazes de suportar até +35V e –35V respectivamente em suas entradas, e entregar 12Vdc e -12Vdc em suas saídas. Os capacitores responsáveis pela filtragem são de 4700uF/35V. O consumo de toda a console foi estimado em torno de 150mA, e a fonte utilizada foi superdimensionada a fim de garantir um baixo nível de tensão de "*ripple*" e um funcionamento ininterrupto sem falhas ou estresse de componentes.

A parte digital do circuito incluindo os potenciômetros controlados digitalmente [6], todo o circuito lógico e o módulo Receptor do controle remoto foram alimentados por uma tensão de ±2,5V. Diferentemente dos circuitos digitais convencionais, onde geralmente se escolhe uma tensão positiva (geralmente 5V) e o terra, esse circuito precisou ser alimentado por uma tensão simétrica por causa dos potenciômetros controlados digitalmente, que devem excursionar os sinais sem ceifamento dos picos [1] dos mesmos.

Estes valores de ±2,5Vdc foram conseguidos através das fontes de tensão de ±12Vdc, com a utilização de dois Diodos Zeners de 2,6V/2W cada, e com resistores de limitação de corrente de 150Ω/2W, que com a corrente de consumo dos circuitos lógicos estipulada em 50mA, nos dá uma queda de tensão de 7,5V em cima de cada resistor, e uma corrente de 62mA através de cada diodo Zener, que corresponde a uma dissipação de potência de 162mW, com bastante folga para os 2W suportados pelos diodos.

Esse valor de ±2,5V representa o limite da alimentação para os potenciômetros, e por ser um valor relativamente baixo, implicou em alguns cuidados especiais que explanarei mais adiante.

O transmissor do controle remoto foi alimentado por uma bateria de 9V. O regulador de tensão 7805 provê os 5Vdc de alimentação necessários aos componentes digitais do controle.

## 3.1 - Controle de Ganho

Este circuito tem o objetivo principal de elevar a relação sinal ruído [1] do sistema. Devido ao fato de não sabermos que tipo de fonte sonora será ligada à console, temos que trabalhar com uma etapa de pré-amplificação de sinais que nos forneça um ganho suficiente para elevar o nível do sinal de entrada dos canais até os níveis desejados, em torno de ±400mV (como veremos a seguir), para que possamos evitar distorções e que a relação sinal ruído do sistema seja menos prejudicada pelas próximas etapas de processamento.

Para o projeto dessa etapa de ganho foi escolhido o Amplificador Operacional OPA134 da Texas Instruments [5]. Este Amplificador é hoje, um dos melhores *AmpOps* para este intuito, pois possui baixíssimo nível de ruído(**8nV/√Hz)** e uma desprezível distorção harmônica de **0,0008%**, além de terem sidos cedidos gratuitamente pela Texas Instruments.

A Figura 3.1 mostra o esquema da etapa de ganho.

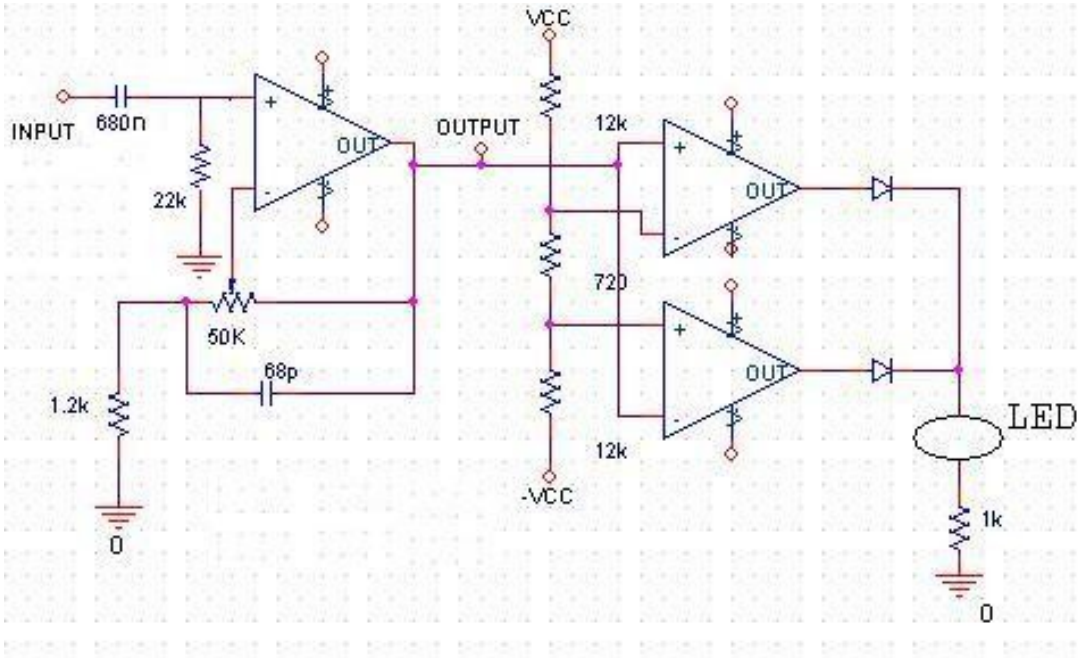


Figura 3.1: Esquema da etapa de ganho.

O primeiro componente que o sinal se depara ao entrar na console é o capacitor de 680nF, responsável pelo desacoplamento DC [1] do circuito. Este capacitor, juntamente com o resistor de 22kΩ, formam um filtro passa-altas com $f_{-3dB}$=1/(2*π*R*C) = **10Hz**, ou seja, abaixo da faixa de áudio.

A impedância de entrada do circuito é definida pelo resistor de 22kΩ, pois o amplificador operacional está na configuração não inversora, e sua entrada positiva possui impedância altíssima, da ordem de 1GΩ.

O controle de Ganho é feito pelo potenciômetro de 50kΩ, que juntamente com o resistor de 1,2kΩ determinam o ganho do circuito: **Ganho** = 1 + 50k/1,2k = **42,66** ou seja, **32,6dB**.

Um capacitor de 68pF foi colocado em paralelo com o potenciômetro, a fim de formar um filtro passa-baixas e atenuar interferências fora do espectro de áudio, e que no melhor caso fornece um corte em **46,8kHz.**

A Figura 3.2 é o resultado de uma simulação no SPICE da etapa de ganho, onde foi utilizada uma entrada senoidal de 10mV e freqüência de 1kHz. O ganho foi ajustado para máximo (32,6dB). A curva de menor amplitude representa o sinal de entrada, e a curva de maior amplitude representa a saída desta etapa.

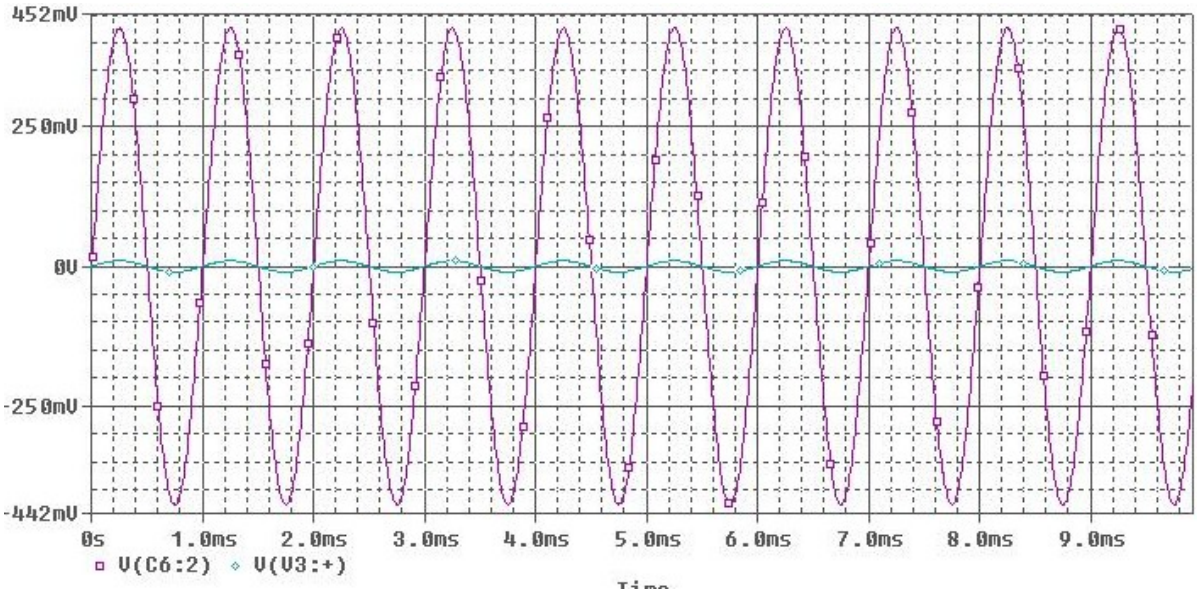


Figura 3.2: Simulação no SPICE da etapa de ganho.

A Figura 3.3 é uma Simulação que nos mostra a resposta em freqüência desta etapa para o ganho ajustado no máximo.

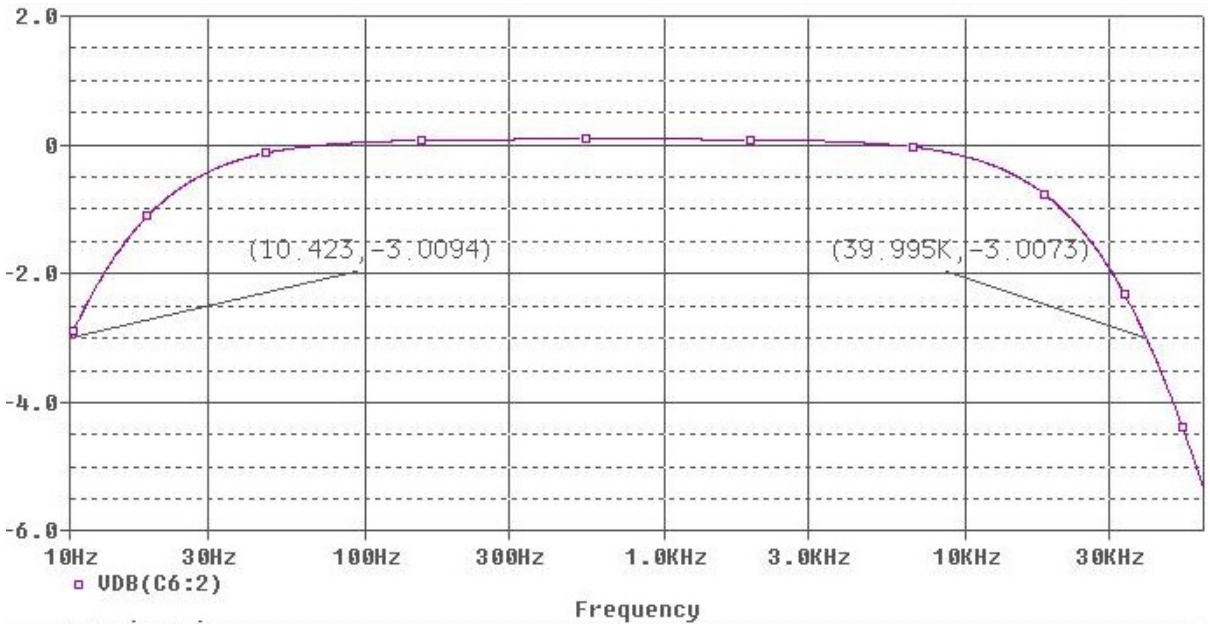


Figura 3.3: Resposta em freqüência da etapa de ganho.

Como podemos observar na figura acima, as freqüências de corte (-3dB), ficaram próximas às teóricas, a discrepância de 6kHz na freqüência de corte superior pode ser justificada pela limitação de banda [1] imposta pelo amplificador operacional já que estamos aplicando um ganho alto, mas de qualquer forma, esta freqüência ainda ficou uma oitava acima da faixa útil para áudio.

A segunda parte deste bloco é composta pelo detector de nível de sinal. Este detector tem o papel importantíssimo de garantir a integridade do sinal que seguirá pelos próximos blocos da console. Seu circuito foi projetado de forma a acionar um LED quando o nível do sinal excursionar fora da faixa de ±400mV.

Quando falamos em integridade do sinal devemos nos atentar a dois parâmetros principais: Relação Sinal Ruído (SNR) e Distorção Harmônica Total (THD) [1]. A SNR poderia ser elevada ao “infinito” (valor teórico ideal) com uma excursão infinita do sinal, mas isso seria impossível, e seus limitantes são justamente as tensões de alimentação dos dispositivos ativos dos circuitos processadores de sinais. Já a THD poderia tender a zero o quanto se quisesse, se diminuíssemos a excursão de sinal a níveis cada vez menores, trabalhando assim cada vez mais na “região linear” dos dispositivos semicondutores, que são os maiores causadores da THD.

Como podemos ver, SNR e THD andam na contramão, ou seja, devemos assumir um compromisso entre esses dois parâmetros de forma a garantir a maior fidelidade possível do sinal processado.

Esses valores de ±400mV foram determinados a partir de simulações no SPICE, onde verifiquei quais deveriam ser os níveis de sinal após a etapa de ganho para que a integridade do sinal pudesse ser garantida na etapa seguinte de Equalização. Em nível de informação, a SNR aceitável em equipamentos de sonorização é de 40dB [7], pois devido a um efeito psicoacústico causado pela nossa "Janela Auditiva", se estivermos ouvindo um programa musical a um nível de X dB SPL (unidade utilizada para referenciar nível de pressão sonora – 0dB SPL= 20micropascal), qualquer sinal abaixo de (X-40)dB SPL será praticamente imperceptível por nós. Na prática, os equipamentos com faixa dinâmica acima de 60dB são considerados profissionais. Quanto aos níveis de THD, garanto que algo em torno de 0,1% são imperceptíveis para 99,9999% dos ouvintes. Níveis em torno de 1% de THD podem ser percebidos por ouvintes mais atentos, dependendo do programa tocado, e níveis acima de 5% tornam-se perceptíveis para qualquer um.

Na etapa de Equalização, foram utilizados vários potenciômetros controlados digitalmente (AD5228) [6], e estes só podem ser alimentados com uma tensão máxima de 5V, que no caso se transformou em ±2,5V para que o sinal de áudio pudesse excursionar normalmente por eles. Mas estes componentes não permitirem uma excursão de sinal entre qualquer um de seus três terminais analógicos e o terra fora deste valor ±2,5V. Então o valor de ±400mV foi resultado de uma série de simulações, onde pude verificar que com estes valores, qualquer tipo de equalização empregada não provocaria ceifamento dos picos do sinal em virtude desta característica do potenciômetro. Por outro lado, esta faixa de ±400mV é um bom valor para se manter uma SNR elevada, desde que sejam tomados cuidados com o "*layout*" e a blindagem das placas de circuito impresso.

Como podemos ver na figura 3.1, o circuito detector de pico age tanto para picos positivos, como para negativos. O cálculo utilizado para determinar esse "*Treshold*" de ±400mV foi o seguinte: Os três resistores ligados às entradas positivas e negativas dos dois operacionais determinam esse "*Treshold*", então, como se desejava uma tensão de 400mv na entrada negativa do primeiro operacional, ficaríamos com uma tensão de 11,6V em cima do primeiro resistor. Estipulei uma

corrente de 1mA através deste resistor, com isso temos que: $R=V/I=11,6V/1mA \cong 12k\Omega$ . Como queremos uma tensão de 400mV na entrada positiva do segundo amplificador operacional, que não drena corrente em sua entrada, esses mesmos 1mA irão fluir pelo segundo resistor, que com uma tensão de 800mV em cima dele, nos dá obrigatoriamente um valor de 800Ω para essa resistência. O caso do terceiro resistor é análogo ao primeiro.

Os amplificadores operacionais neste caso estão agindo sem realimentação [1] alguma, por isso, estão atuando como comparadores, e só entregam em suas saídas os valores correspondentes às suas alimentações de ±12V. Foram utilizados também dois diodos a fim de proteger as saídas dos amplificadores operacionais, e um resistor para limitar a corrente através do LED.

## 3.2 – Etapa de Equalização

O equalizador pode ser visto como o coração de uma Console. É nesta etapa que são introduzidas as maiores deformações no sinal: Distorção, Ruído, Rotação de Fase, etc.

O projeto do Equalizador é guardado em segredo pelos grandes fabricantes das consoles mais renomadas do mundo, como: SSL, Midas, Neve, Klark Technics e SoundCraft.

Um circuito bem projetado, além de garantir que o sinal receberá a equalização aplicada, também garante que este sofrerá o menor prejuízo ao passar por esta etapa, mesmo depois de ter todo seu espectro alterado pela ação do equalizador.

Muitos pesquisadores já propuseram em suas teses as mais variadas topologias de equalizadores, mas talvez o mais popular deles seja a topologia de Baxandall. Muito dos projetos de equalizadores da atualidade se baseiam nessa topologia, pois além de serem fáceis de implementar, também oferecem uma boa fidelidade no processamento.

A topologia utilizada por mim nesse projeto, Figura 3.4, é bastante parecida com a de Baxandall, e foi extraída do site Polonês: www.Republika.com, que dispõe de diversos esquemáticos de circuito ligados a Áudio. Este circuito me chamou a atenção pelo fato do site comentar que já serviu de base para o projeto de diversos

equalizadores da marca SoundCraft [8]. Como estes circuitos são quase impossíveis de terem seus desempenhos avaliados apenas por cálculos, decidi dar ênfase aos testes práticos e simulados.

Antes de decidir por utilizar esta topologia, eu já havia simulado vários outros circuitos que não apresentaram resultados satisfatórios, e por isso foram deixados de lado, na maioria deles por não apresentarem uma regularidade no valor de seus parâmetros durante as diversas atuações em seus controles. Esta topologia foi a única que apresentou resultados satisfatórios, com isso, resolvi montar um protótipo na "protoboard" para analisar melhor seus resultados práticos.

Logo nos primeiros testes sônicos pude perceber que se tratava de uma topologia adequada para compor minha console, pois além de não degradar de forma significativa os sinais que processava, também atuava de forma bem precisa, de acordo com as alterações requisitadas em seus potenciômetros.

A topologia dispõe de três controles básicos: Controles de Graves através de filtragem do tipo *Shelving*; controle de Médios com filtragem do tipo *Peaking*, com opção de controlar a freqüência de atuação do filtro; e Controle de Agudos, com filtragem do tipo *Shelving*. Todos os três controles podem tanto enfatizar como atenuar em 15dB as freqüências de sua banda de atuação, e com exceção do controle de freqüência de atuação do filtro de médios, todos os outros controles do equalizador são controlados remotamente.

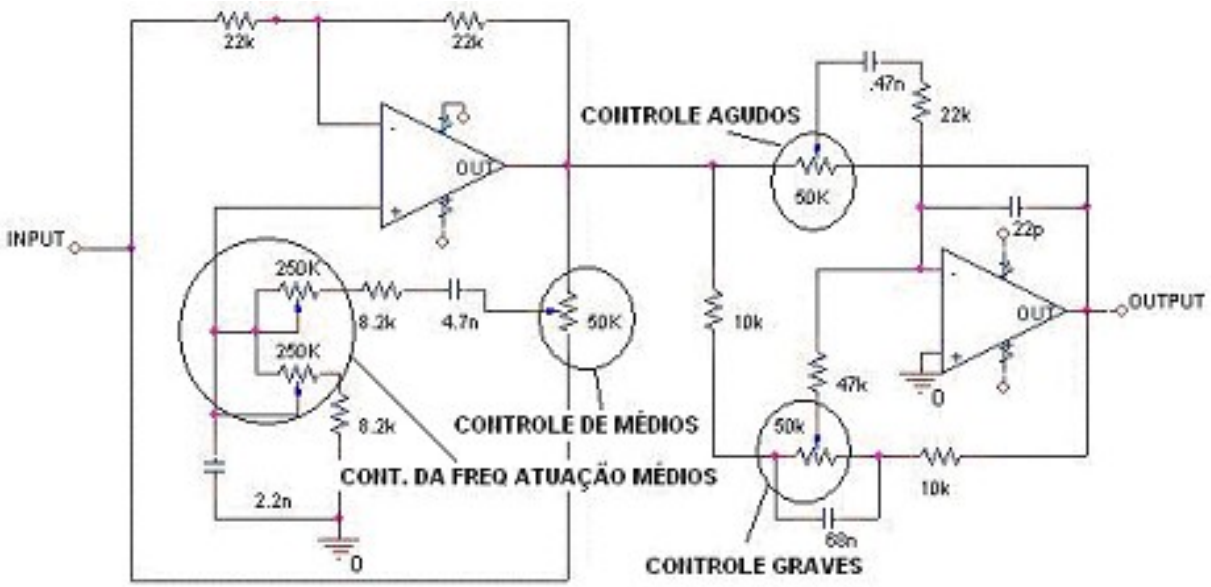

Figura 3.4: Diagrama Esquemático do Circuito equalizador.

Através de simulações, consegui aprender como manipular alguns componentes de forma a alterar os valores das freqüências de atuação dos filtros e os valores máximos de ganho e atenuação de cada controle. Estes parâmetros não possuem muito sentido na teoria, por isso foram alterados a partir de testes auditivos até se mostrarem agradáveis na equalização de diversos instrumentos.

A figura 3.5 nos mostra a simulação da resposta do filtro de graves, onde podemos visualizar dez posições de controle, indo desde a atenuação máxima até o ganho máximo.

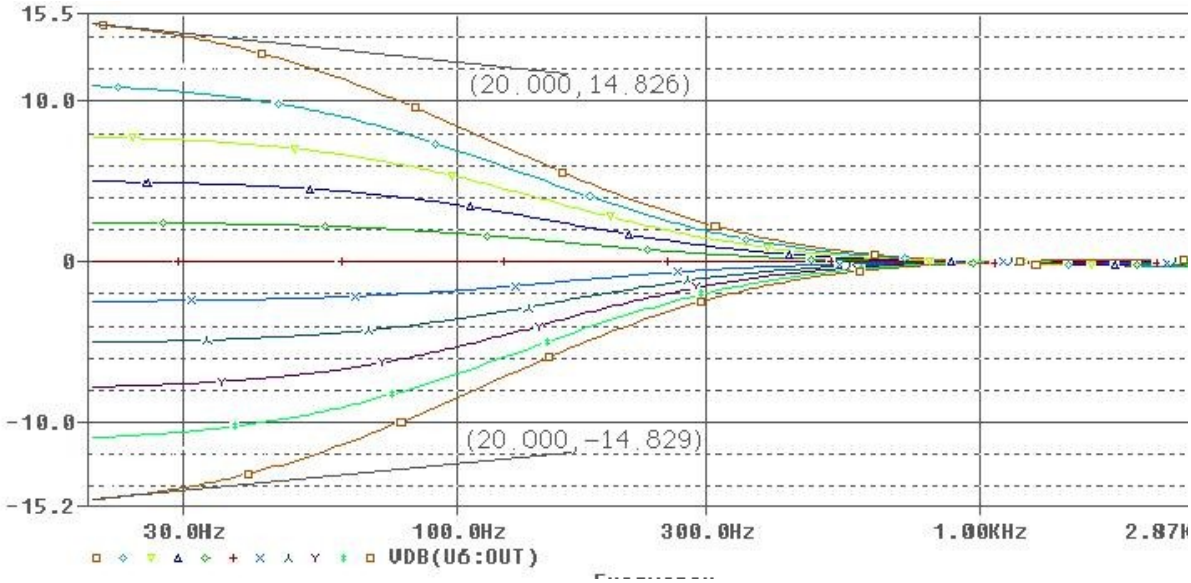


Figura 3.5: Resposta em freqüência do filtro de graves.

Como podemos notar, o circuito trabalha de forma extremamente simétrica na atenuação e no ganho, ou seja, existe uma simetria em relação ao ponto de não atuação do circuito (quando o potenciômetro de controle está posicionado no meio). Esta característica pode parecer simples de ser conseguida, mas de todos os circuitos que simulei, este foi o único que apresentou esta virtude. Também podemos ver que o ganho e a atenuação alcançados ficaram muito próximos do valor teórico de ±15dB.

A figura 3.6 nos mostra a resposta do filtro de médios, onde podemos visualizar dez posições de controle, indo desde a atenuação máxima até o ganho máximo.

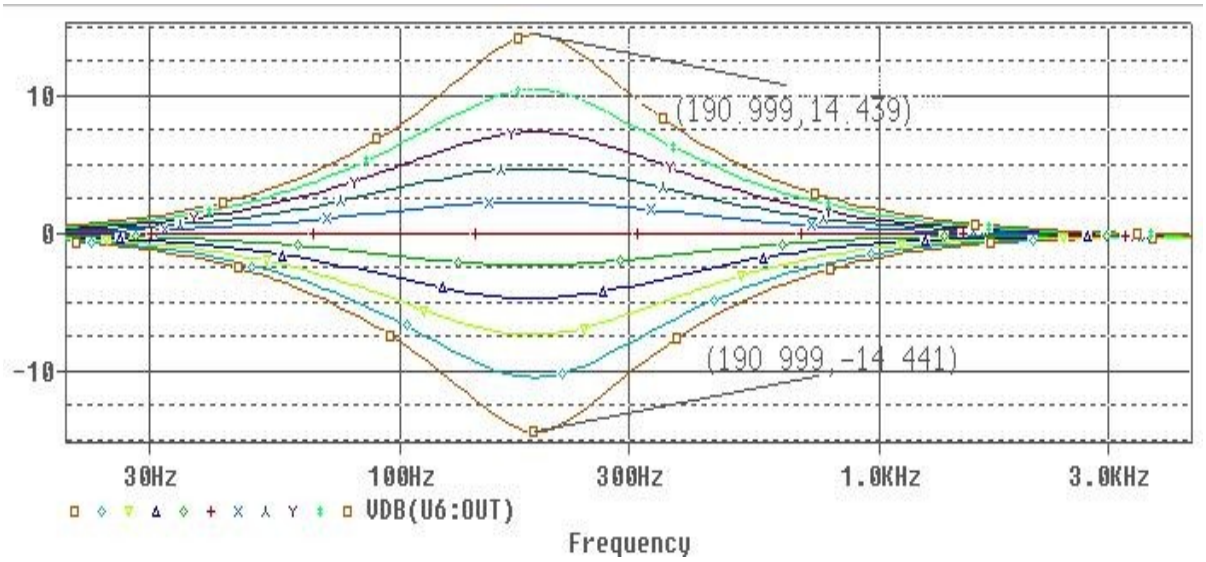


Figura 3.6: Resposta em freqüência do filtro de médios.

Como vemos, a resposta deste filtro também é simétrica em relação ao ponto de não atuação, mantendo constante a freqüência de atuação para todos os níveis de ganho ou atenuação. O fator de qualidade do filtro varia de acordo com o nível de ganho/atenuação, atingindo um valor máximo de 1,4 quando o ganho/atenuação é máximo.

A figura 3.7 nos mostra a resposta do filtro de médios, mas agora mostrando as dez curvas produzidas quando variamos do mínimo ao máximo o cursor do potenciômetro responsável pela seleção da banda de atuação. O Ganho estava ajustado no valor máximo.

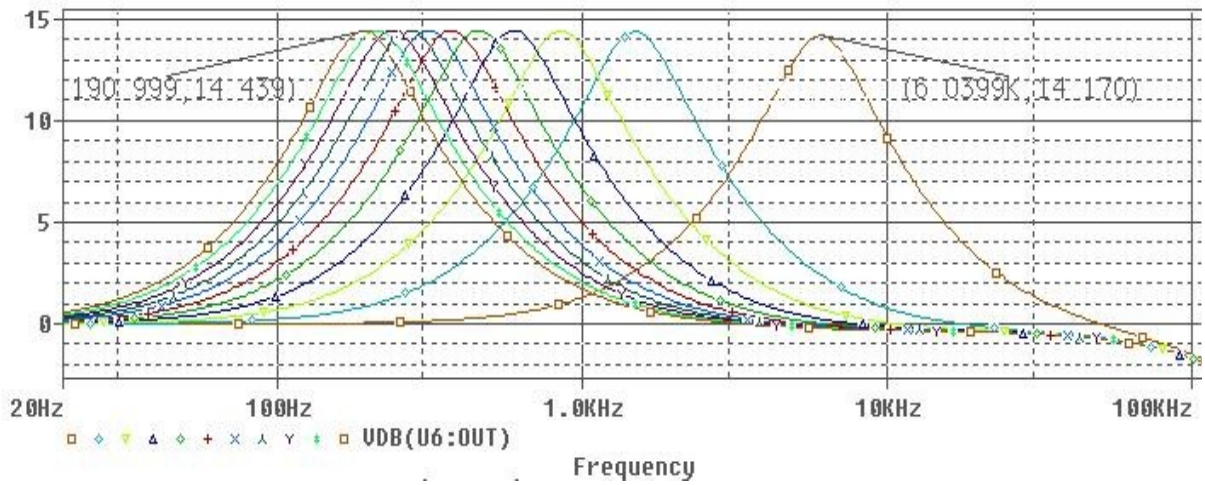

Figura 3.7: Seleção da banda de atuação do filtro de médios, com o ganho no máximo.

A Figura 3.8 reproduz as mesmas condições da figura anterior, mas agora o ganho foi ajustado no valor mínimo.

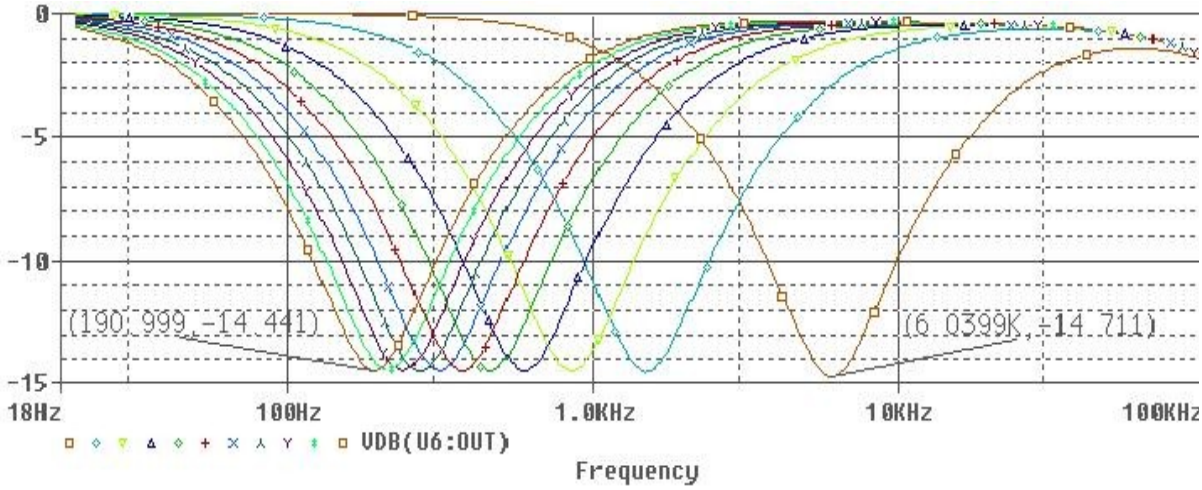


Figura 3.8: Seleção da banda de atuação do filtro de médios, com o ganho no mínimo.

Como podemos ver, o circuito mantém o fator de qualidade mesmo quando variamos a banda de atuação. O circuito pode agir em qualquer faixa de freqüências entre 200Hz – 6,03kHz. Outra vantagem desta topologia está no fato do circuito poder ser dividido em duas partes, uma responsável pela filtragem de graves e agudos, e outra responsável apenas pela filtragem de freqüências médias, assim poderíamos produzir outros blocos e ajustá-los para agirem em faixas diferentes, adicionando quantos controles de tonalidade fossem necessários.

A figura 3.9 nos mostra a resposta do filtro de agudos, onde podemos visualizar dez posições de controle, indo desde a atenuação máxima até o ganho máximo.

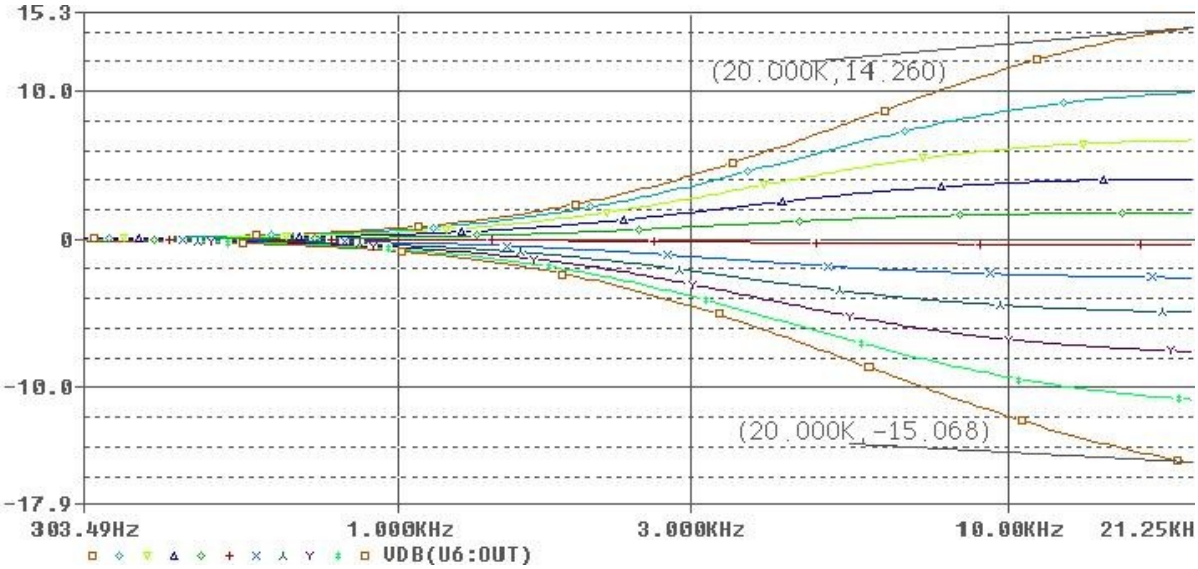


Figura 3.9: Resposta em freqüência do filtro de agudos.

Este filtro também atua de forma simétrica em relação ao eixo de não atuação. O fato do módulo do valor da atenuação máxima (15,068dB) ter ficado acima do módulo do valor do ganho máximo (14,260) pode ser explicado pela introdução do capacitor de 22pF entre a saída do segundo amplificador operacional e sua entrada negativa, formando assim, um filtro passa-baixas [1] que funciona como um atenuador de freqüências fora da faixa de áudio, reduzindo assim problemas de Intermodulação [1].

## 3.3 – Controle de Volume do Canal e Mandada Auxiliar

A figura 3.10 representa o Diagrama Esquemático do Circuito:

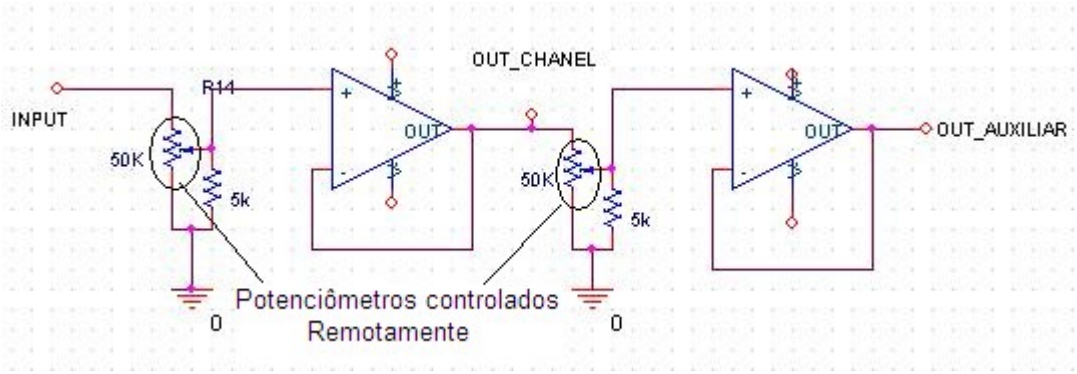


Figura 3.10: Circuito de controle de volume do canal e Mandada Auxiliar.

Como podemos ver, esta etapa é composta apenas por dois controles passivos, com a função de atenuar os sinais provenientes das etapas anteriores, seguidos de um "*buffer*" [1].

Na entrada são recebidos os sinais provenientes da etapa de equalização. Logo de início, o sinal passa por um potenciômetro controlado digitalmente que será utilizado para implementar o controle remoto destas atenuações. Em paralelo com o pino 2 e 3 deste potenciômetro foi colocado um resistor de 5kΩ (4,7kΩ - valor comercial) a fim de simular uma curva logarítmica [7], pois não existe a versão logarítmica para este potenciômetro controlado digitalmente, e devido às nossas características auditivas, onde nossos sensores auditivos percebem as alterações de nível sonoro logaritmicamente [3], não seria eficiente implementar essa atenuação através de uma curva linear.

Como foi dito anteriormente, a alimentação destes potenciômetros foi feita de forma simétrica (±2,5V) para que os sinais pudessem excursionar normalmente por eles.

Logo após o primeiro operacional temos o "*output*" do canal, que seguirá para a etapa seguinte que irá somar os dois canais da console. Este "output" do canal também é enviado para o controle de atenuação passiva da mandada auxiliar, que também será controlado remotamente. Este sinal da mandada auxiliar tem a função de enviar parte do sinal do canal a um processador de efeitos externo (*Reverb,*

*Delay, Chorus*, etc) que depois de processado retorna à console para ser somado aos dois canais e serem endereçados à saída principal da console.

## 3.4 – Somador de Sinais e Controle do Volume de Saída

A Figura 3.11 mostra o Diagrama Esquemático do Circuito.

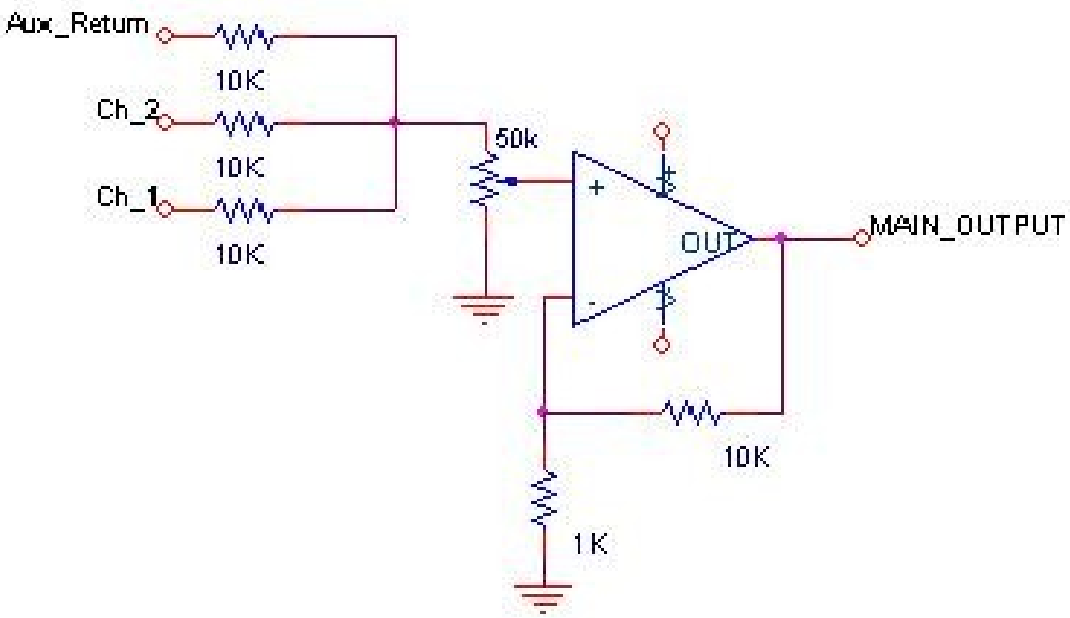


Figura 3.11: Circuito somador de sinais e controle do volume de saída.

Como podemos ver, trata-se de um circuito bem simples, cuja única função é somar os sinais provenientes dos canais 1 e 2 da console e o sinal que retorna do processador de efeito externo. O potenciômetro de 50kΩ funciona como um controle geral de volume da console. Este somador tem um ganho de aproximadamente 21dB. Este ganho é responsável por contornar os desvios de ganho nas etapas da console, como também adaptar a console as diversas sensibilidades dos equipamentos que virão após ela.

Um outro somador também foi necessário para somar os sinais das saídas auxiliares dos canais 1 e 2. Neste caso não foi necessária a inclusão da etapa de ganho, pois os processadores de efeito possuem um controle de ganho em sua entrada. O circuito é mostrado abaixo na Figura 3.12.

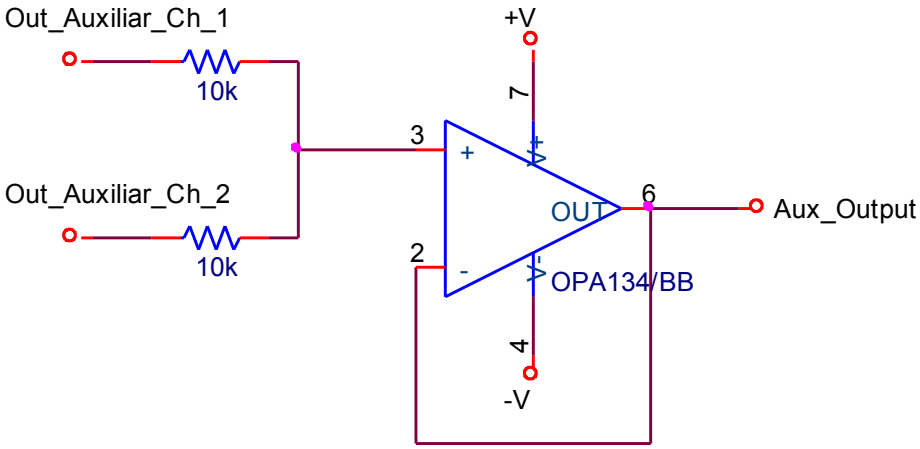


Figura 3.12: Circuito somador dos sinais das saídas auxiliares dos canais 1 e 2.

## 4 – Resultados Experimentais

Neste capítulo serão mostrados os resultados levantados experimentalmente. Estes dados foram levantados utilizando um analisador de espectro, onde todos os resultados apresentados a seguir foram obtidos em apenas um dos canais da console, e na entrada deste canal testado foi introduzido um sinal com varredura lenta de 20Hz à 20kHz. As leituras foram feitas na saída principal da console.

Na figura 4.1 é mostrada a saída da console com os controles de tonalidade *Flat,* ou seja, sem nenhuma atuação.

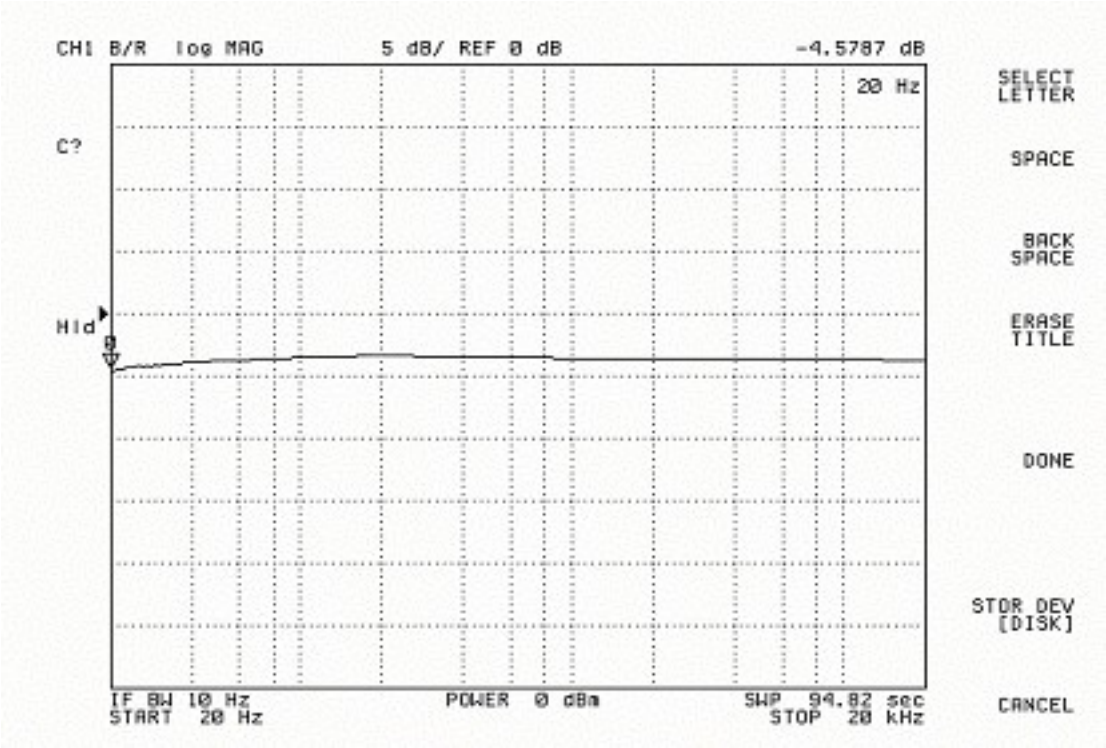


Figura 4.1: Resposta em freqüência da console na condição “flat”.

Podemos ver que neste ponto não existe qualquer atuação apreciável do circuito em relação ao sinal de entrada, a única percepção que temos é a dos filtros passa-altas (introduzido na entrada de ganho pelo capacitor de acoplamento) e passa-baixas (introduzido na etapa de equalização para evitar intermodulação em freqüências fora da faixa de áudio).

A figura 4.2 foi levantada com o controle de tonalidade dos graves no máximo, onde o ganho esperado é de 15dB.

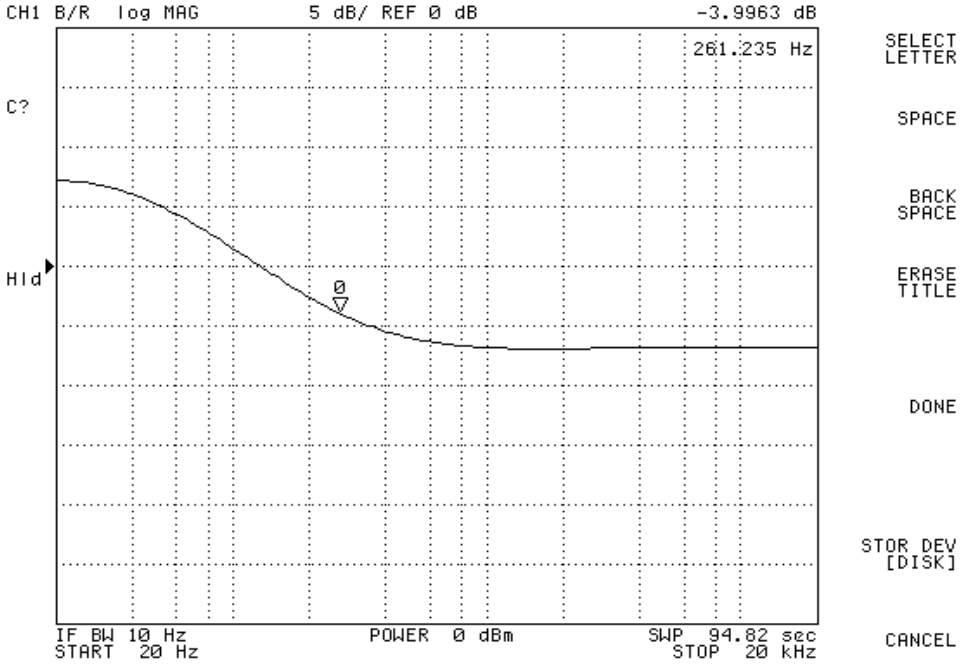


Figura 4.2: Resposta em freqüência da console com o controle de graves no máximo.

A figura 4.3 foi levantada com o controle de tonalidade dos graves no mínimo, onde o ganho esperado é de -15dB.

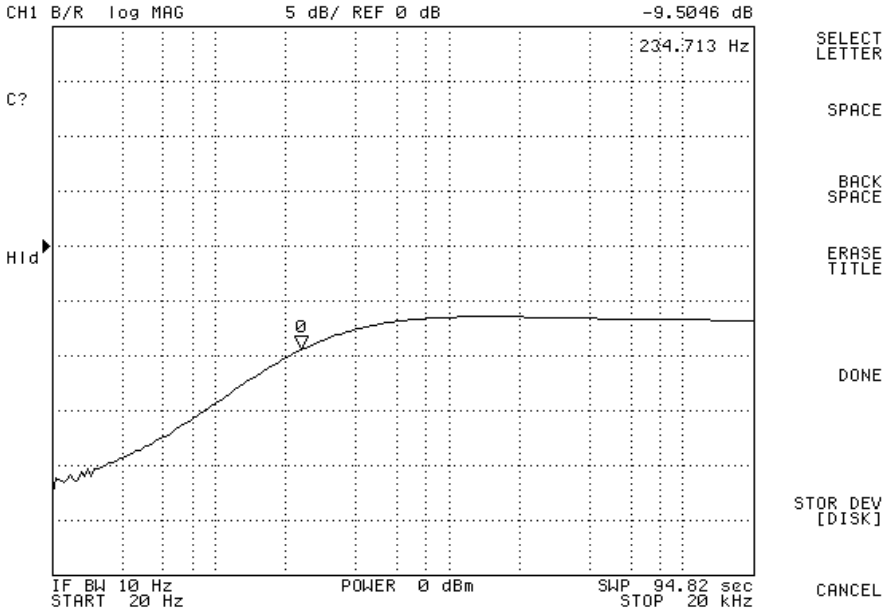


Figura 4.3: Resposta em freqüência da console com o controle de graves no mínimo.

Como podemos ver, o resultado prático ficou bem próximo do resultado simulado, e o filtro atendeu totalmente às expectativas.

A figura 4.4 foi levantada com o controle de tonalidade dos médios no máximo, onde o ganho esperado é de 15dB.

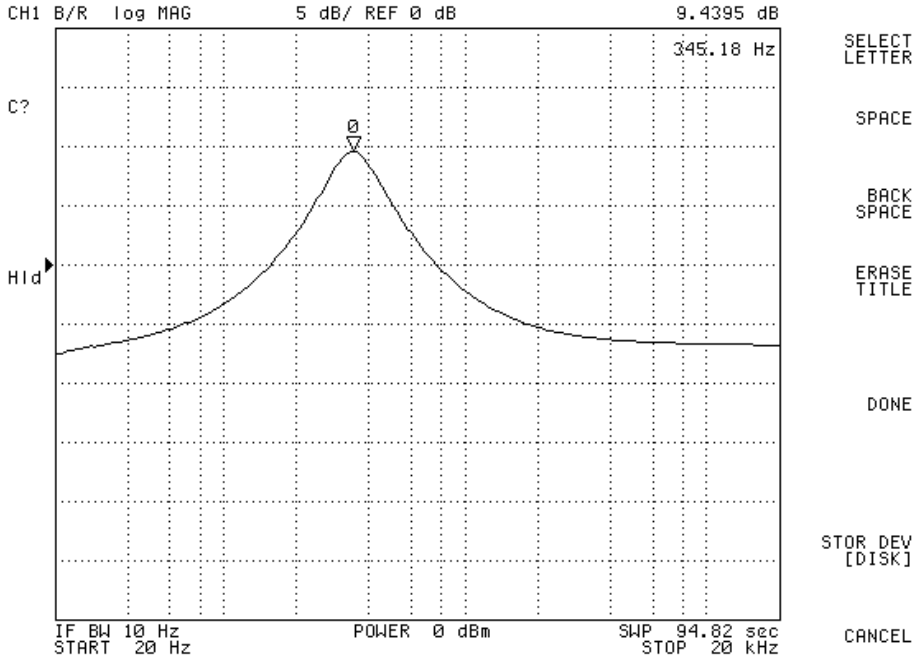


Figura 4.4: Resposta em freqüência da console com o controle de médios no máximo.

A figura 4.5 foi levantada com o controle de tonalidade dos médios no mínimo, onde o ganho esperado é de -15dB.

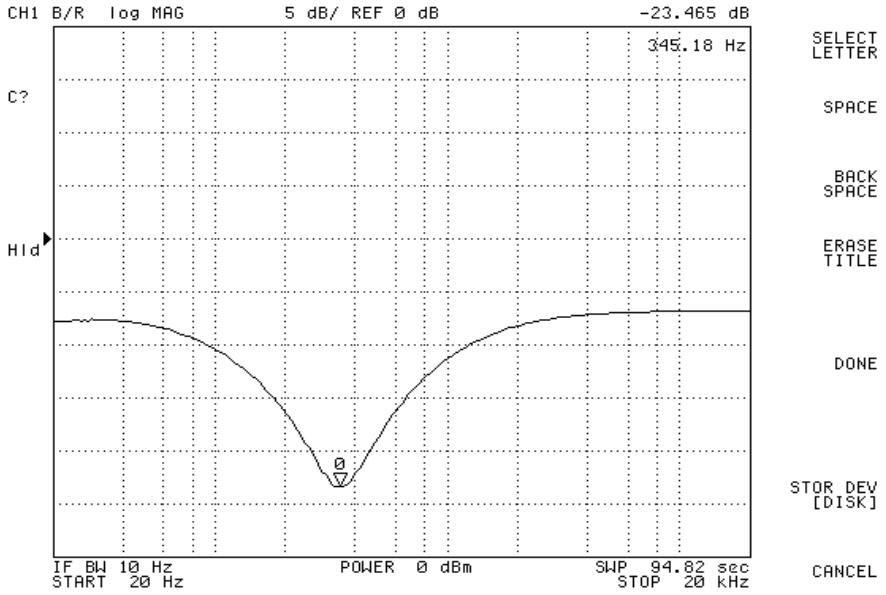


Figura 4.5: Resposta em freqüência da console com o controle de médios no mínimo.

Novamente, o valor encontrado na prática ficou bem próximo ao esperado.

A figura 4.6 foi levantada com o controle de tonalidade de agudos no máximo, onde o ganho esperado é de 15dB.

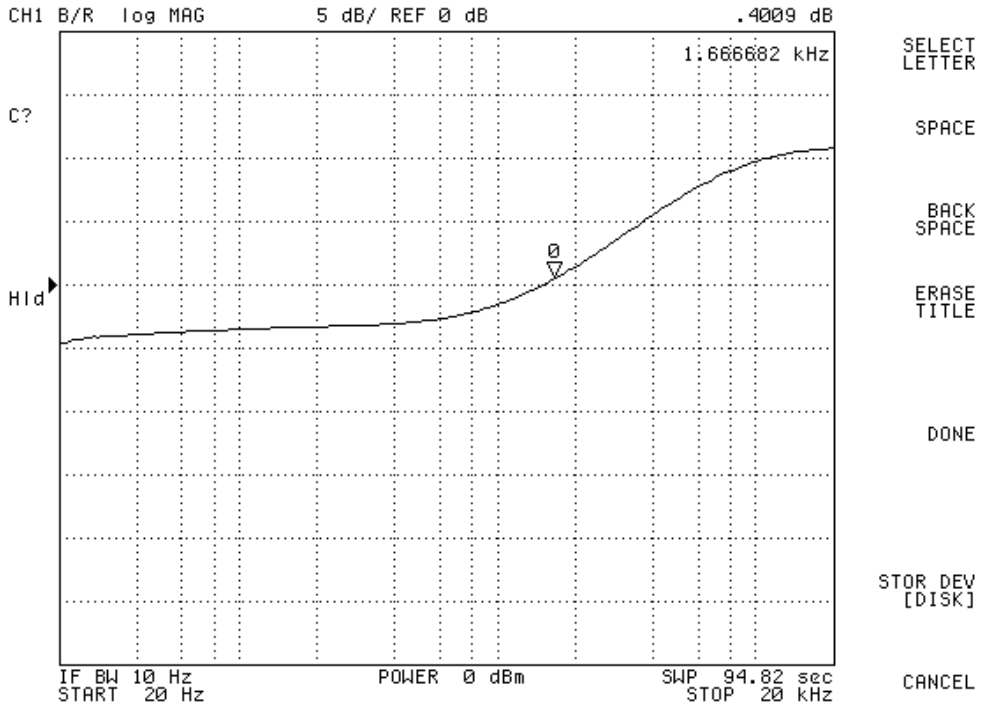


Figura 4.6: Resposta em freqüência da console com o controle de agudos no máximo.

A figura 4.7 foi levantada com o controle de tonalidade de agudos no mínimo, onde o ganho esperado é de -15dB.

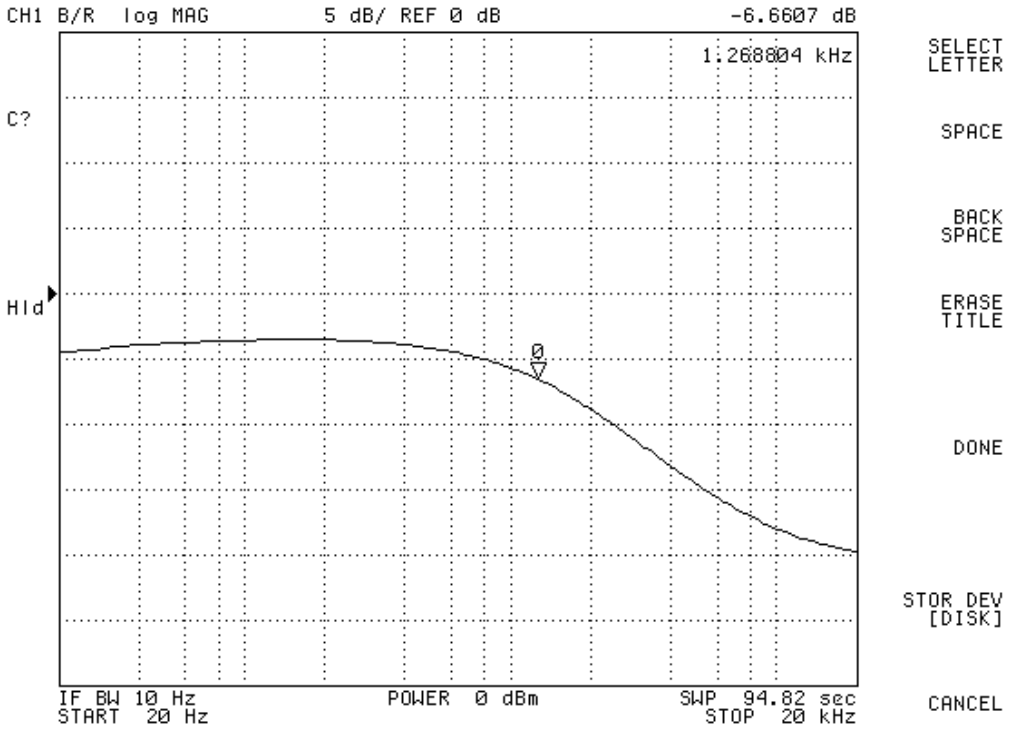


Figura 4.7: Resposta em freqüência da console com o controle de agudos no mínimo.

Novamente os resultados experimentais ficaram muito próximos aos resultados simulados.

A figura 4.8 demonstra a interação do filtro de graves com o filtro de agudos, onde o controle de tonalidade de graves encontra-se no máximo e o controle de agudos no mínimo. Na figura 4.9 verifica-se o mesmo procedimento, mas com o controle de graves no mínimo e o de agudos no máximo.

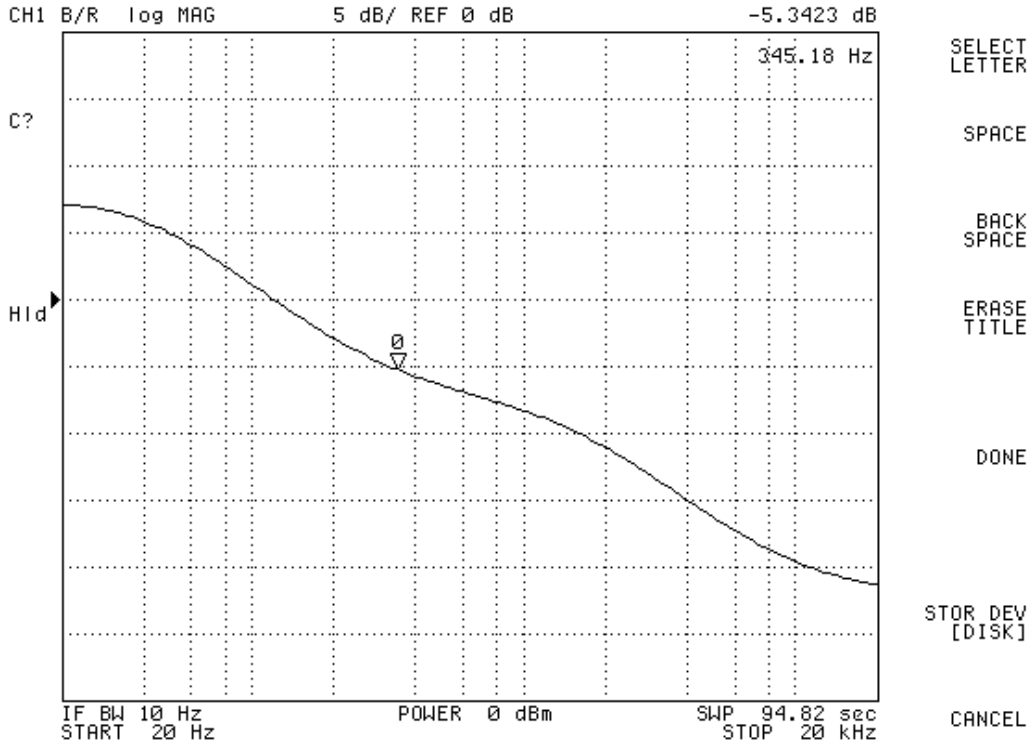


Figura 4.8: Resposta em freqüência da console com o controle de graves no máximo e o de agudos no mínimo.

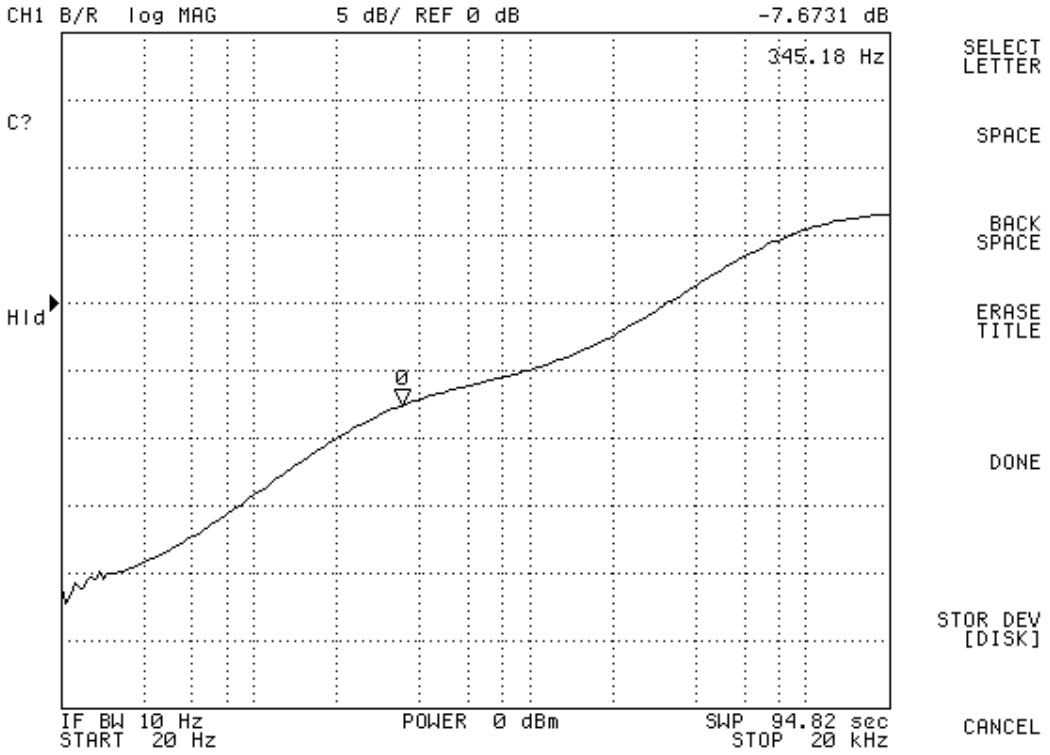


Figura 4.9: Resposta em freqüência da console com o controle de graves no mínimo e o de agudos no máximo.

Vamos analisar agora os resultados mais importantes no que diz respeito à qualidade de um equipamento de áudio: Os níveis de THD e a Faixa Dinâmica do equipamento.

A faixa dinâmica [1] foi calculada considerando-se a potência total do ruído equivalente na entrada do circuito, na faixa de freqüências de 20 a 20kHz, e um sinal de entrada máximo de $350mV_{RMS}$. A partir de cálculos dos dados do Analisador de espectro colocados numa planilha no Excel, encontramos uma faixa dinâmica de 62,1dB, ou seja, um ótimo nível dentro dos valores que citei anteriormente, onde podemos por este parâmetro dizer que o equipamento pode ser classificado como profissional.

Para a THD realizamos duas medidas. Na primeira medida, injetei um sinal senoidal de 1kHz com $800mV_{pp}$ na entrada, e na outra medida injetei o mesmo sinal de 1kHZ, mas agora com $400mV_{pp}$. Nos dois casos mantive o ganho do canal unitário e os volumes do canal e do Master no máximo.

Para a primeira medida obtive uma leitura no Analisador de -16,3dBm para o sinal de 1kHz, -67,7dBm para o segundo harmônico(2kHz), e -94,5dBm para o terceiro harmônico(3KHz), os demais harmônicos foram desconsiderados por apresentarem níveis desprezíveis. Realizando os cálculos determinei a THD de 0,269%.

Para a segunda medida obtive uma leitura no Analisador de -22,06dBm para o sinal de 1kHz, -93,6dBm para o segundo harmônico (2kKHz), e -101dBm para o terceiro harmônico (3kHz), os demais harmônicos foram desconsiderados por apresentarem níveis desprezíveis. Realizando os cálculos determinei a THD de 0,0288% , ou seja, valores totalmente imperceptíveis para qualquer ser humano por mais aguçada que seja sua audição [9].

# 5 – Controle Remoto e sistemas de controle

## 5.1 – Transmissor do Controle Remoto

O sistema de controle remoto da console foi projetado para operar num raio de 50m, distância mais do que suficiente para o operador tirar suas conclusões sobre as alterações necessárias nos controles da console.

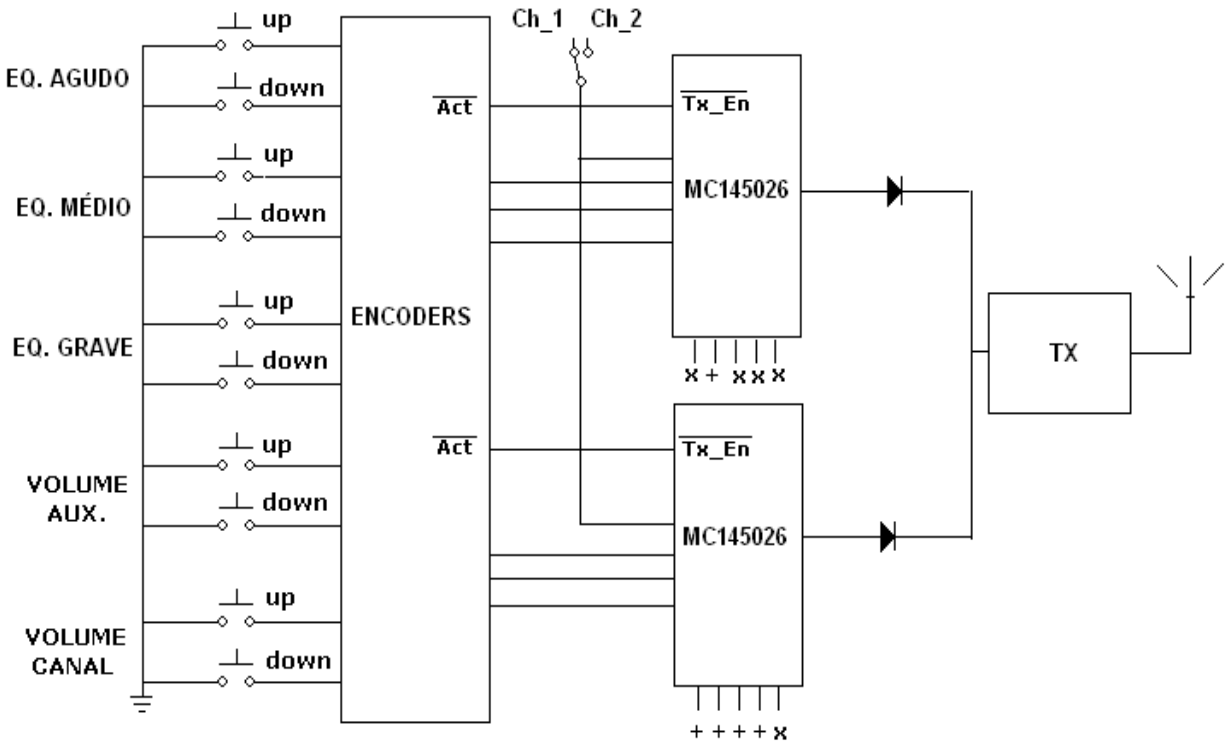


Figura 5.1: Diagrama de blocos do circuito do transmissor.

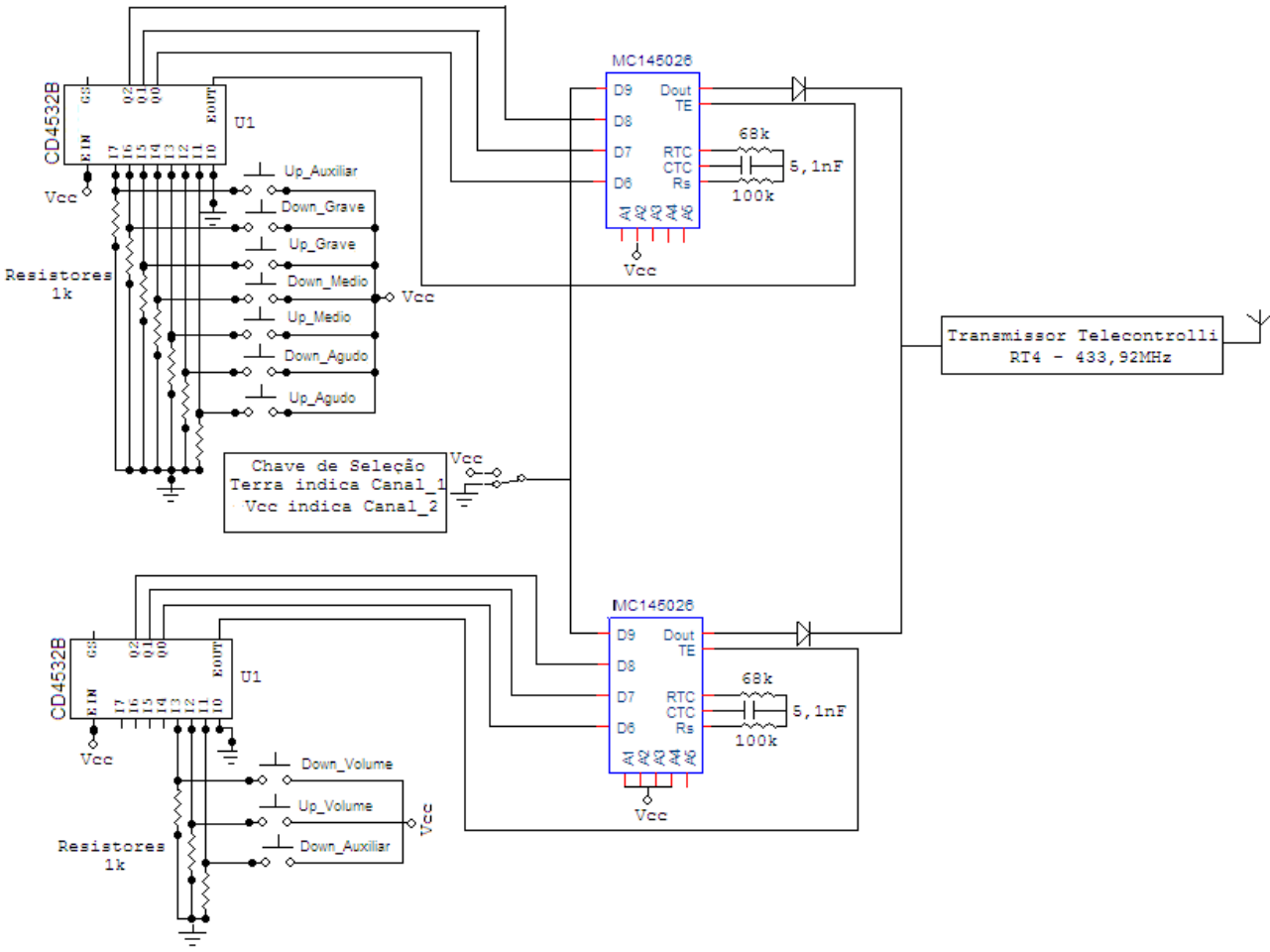


Figura 5.2: Diagrama esquemático do circuito do transmissor.

Como podemos ver, o controle é dividido em 5 ajustes, onde cada um possui um switch *up* e um *down.* Uma chave fica responsável por oferecer a possibilidade de controlar o canal 1 ou o canal 2.

Para realizar a função lógica do circuito foram necessários dois CIs CD4532B [10], responsáveis por codificar os 10 sinais de controle em 3 bits, que são encaminhados aos 3 bits menos significativos das entradas dos CIs Motorola MC145026, o quarto bit é responsável por chavear o controle entre os canais 1 e 2.

Os CIs Motorola MC145026 realizam uma codificação dos sinais de entrada que varia de acordo com o nível lógico dos pinos 1-5, esses pinos são chamados de pinos de endereço. Esses pinos podem tanto estar aterrados, ligados ao Vcc ou abertos, o que nos dá $3^5$ (243) codificações diferentes, ajudando a evitar acionamentos por interferências externas. Este CI também necessita que sejam ligados três componentes externos a ele para definir o valor do *clock* de codificação,

ou seja, por se tratar de componentes analógicos, a gama de valores desse *clock* é muito grande, oferecendo assim um outro recurso que ajuda a proteger o circuito contra interferências de outros sistemas que estejam operando na mesma freqüência. Neste caso o *clock* foi estabelecido no o valor de 1,25kHz.

Pelo fato de apenas um desses CIs operar por vez, pude introduzir em suas saídas um diodo, responsável por fazer a junção dos dois CIs num único transmissor.

O circuito transmissor de RF foi implementado pelo módulo RT4 [11] da Telecontrolli, trabalhando na freqüência de 433,92MHz, e sua antena foi implementada pela adaptação de uma vareta de solda elétrica no tamanho de ¼ do comprimento de onda, obtendo com isso um raio de trabalho maior do que os 50 metros desejados inicialmente. A alimentação do circuito é feita por uma bateria de 9V, mas foi necessário utilizar o regulador de tensão 7805 para fornecer os 5V exigidos pelos codificadores. Apenas o Telecontrolli foi alimentado diretamente com 9V.

## 5.2 – Receptor do Controle Remoto e interface de comando

Este módulo é responsável por receber os comandos do controle remoto, decodificá-los, e distribuir todos os sinais de controle aos potenciômetros controlados digitalmente. Por motivos práticos, nesta mesma placa é implementada a conversão dos +12V e -12V provenientes da fonte de alimentação em +2,5V e -2,5V, e todas as tensões de alimentação de todos os outros módulos da console originam-se desta mesma placa, centralizando assim o emaranhado de fios, evitando assim os "*loops* de terra".

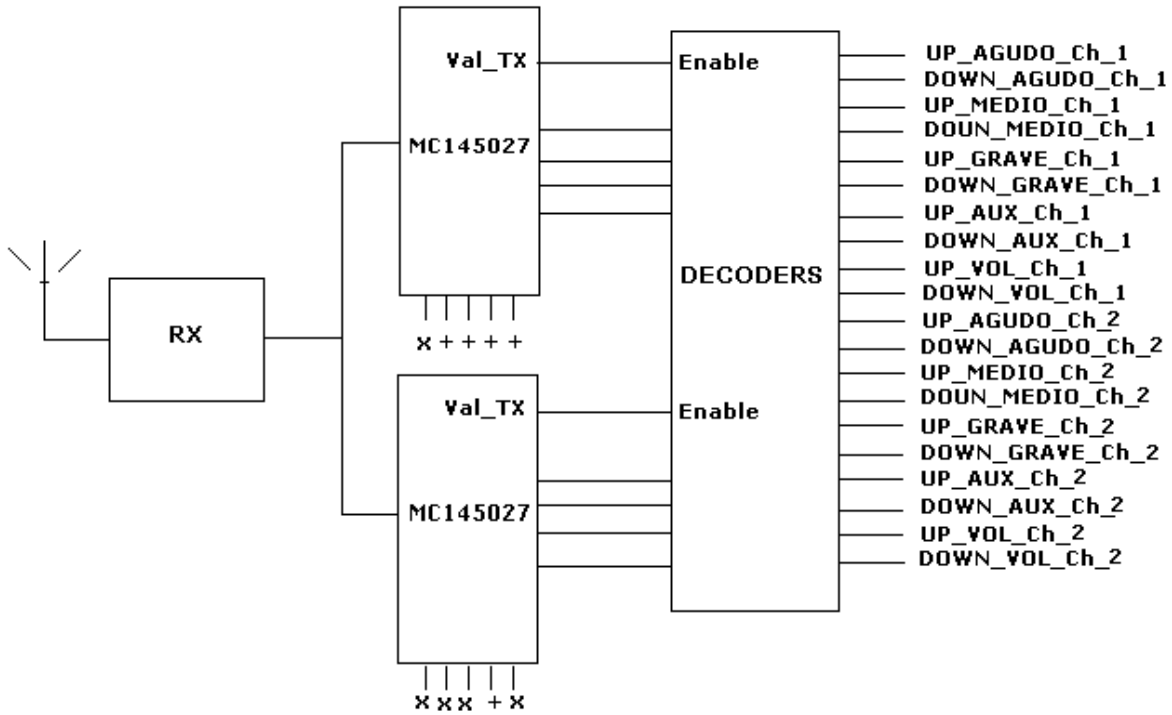


Figura 5.3: Diagrama de blocos do circuito receptor.

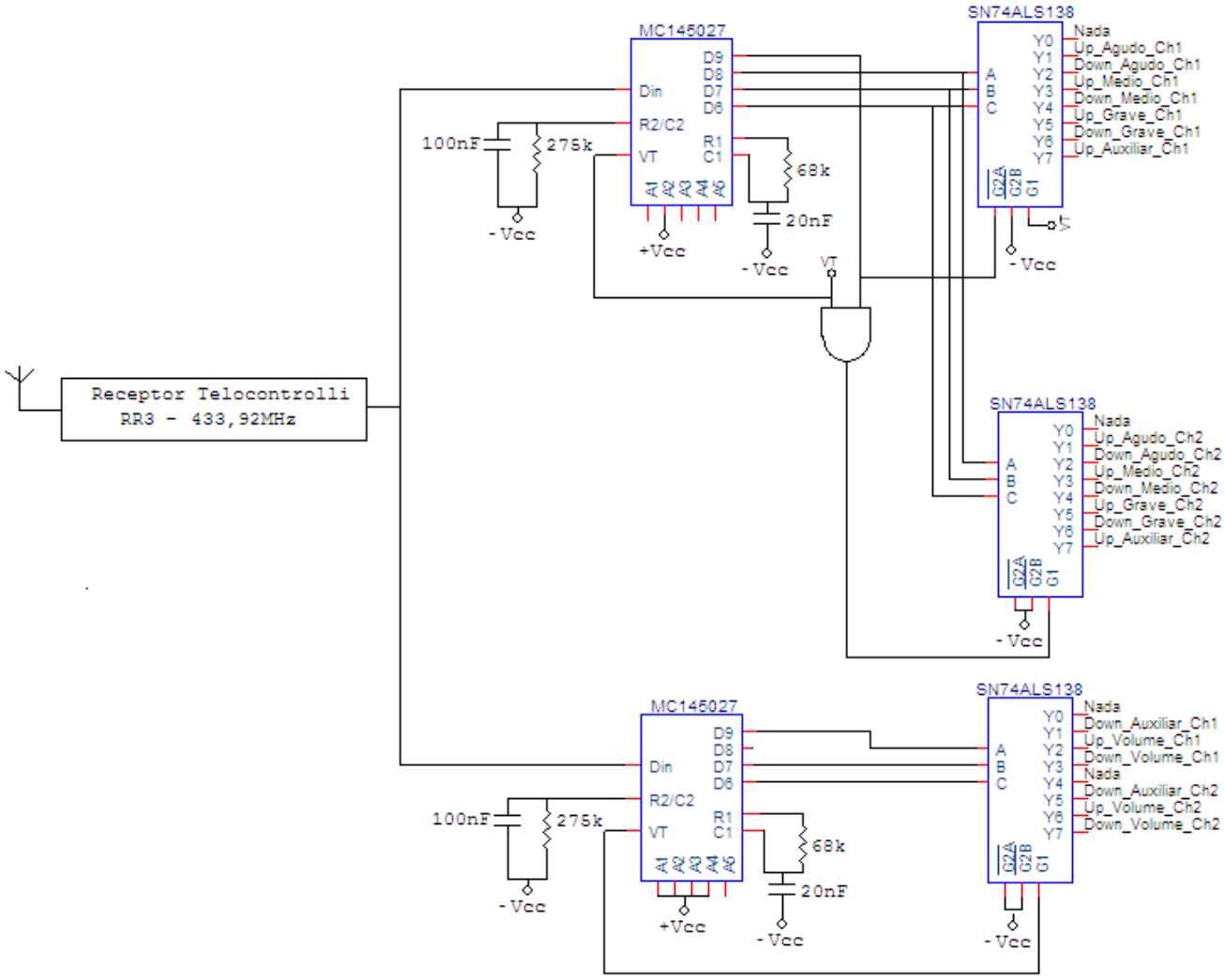


Figura 5.4: Diagrama esquemático do circuito receptor.

A parte responsável pela distribuição de energia não foi mostrada na figura acima. Como podemos ver, o controle é formado por um receptor de RF, dois CIs Decodificadores da Motorola e *Decoders* lógicos.

Para implementar o receptor de RF foi utilizado o módulo RR3 da Telecontrolli [11] trabalhando em 433,92MHz, a antena novamente foi improvisada por uma vareta de solda elétrica cortada em ¼ do comprimento de onda da freqüência acima, e gerou ótimos resultados. Na saída do telecontrolli foram ligados dois CIs Motorola MC145027 [10], responsáveis por decodificar o sinal recebido. Cada CI possui uma saída com 4 Bits que foram ligados a uma lógica que decodifica esses bits recebidos e controla a entrega de todos os 20 sinais de controle da console. Essa lógica foi implementada utilizando 3 CIs da Texas Instruments SN54ALS138A e uma porta lógica. Pelo fato desses 3 CIs trabalharem com lógica invertida, ou seja, quando

uma saída é selecionada ela passa de Vcc para terra, não foi necessário utilizar inversores em suas saídas, pois os potenciômetros digitais também trabalham com lógica invertida.

## 6 – Conclusão

O objetivo inicial do projeto que era projetar e montar uma console com dois canais controlados remotamente foi atingido com êxito. Apesar de o projeto estar restrito à apenas dois canais, estes formam o núcleo de qualquer console mais elaborada, e podem ser expandidos de forma modular, pois a topologia utilizada permite esta expansão.

Os parâmetros técnicos levantados ficaram acima de minhas expectativas inicias, pois apesar de utilizar componentes de alta qualidade, o projeto foi feito de forma quase toda artesanal, e mesmo assim não tive que refazer nenhum layout, nem modificar a posição de nenhum componente a fim de solucionar problemas de oscilação ou ruído. Em cada módulo projetado tive o cuidado de escolher a topologia a ser utilizada e os valores desejados, além de muita simulação que me levou à escolha dos valores de cada componente.

Os resultados simulados no SPICE já previam um ótimo desempenho do equipamento, mas como alguns problemas só aparecem na prática, os resultados medidos foram aguardados com ansiedade, e finalmente consegui comprovar a qualidade do equipamento a partir dos valores medidos e posteriormente com testes auditivos.

Todo o processamento de sinais do projeto foi realizado de forma analógica, ficando então para um trabalho futuro a programação de um DSP [7] a fim de implementar um processamento totalmente digital, aumentando ainda mais o nível de qualidade do equipamento. A implementação dos filtros e demais controles em DSP tornará o projeto mais atrativo, pois estes processadores caem de preço a cada dia, e hoje já podem ser encontrados *DSPs* na faixa de $10 capazes de realizar todo o processamento utilizado neste projeto em tempo real.

## 7 – Referência Bibliográfica


[1] - Microeletrônica - Kenneth C. Smith e Adel S. Sedra. - Ed. Makron Books, quarta edição.

[2] - Forum de Discussão sobre Audio - www.audiolist.cjb.net

[3] - Revista Áudio Música & Tecnologia – Edições Diversas

[4] - Artigos técnicos de autoria de Rui Monteiro - www.studior.com.br

[5] - Datasheet Amplificador Operacional Texas Instruments - OPA134 / OPA2134 / OPA2604 - www.ti.com

[6] - Datasheet Potenciômetro Digital Analog Devices: AD5228 - www.analogdevices.com

[7] - Artigos técnicos e FAQ, vários autores - www.audiolist.cjb.net

[8] - Site de fabricantes de sistemas de Áudio: www.mackie.com / www.soundcraft.com / www.Behringer.com / www.rane.com / www.hotsound.com.br / www.jblpro.com

[9] - Apostila do Curso de Sistemas de Audio para Ambientes Internos e Externos - Carlos Pedruzzi, Rio Música, 1999.

[10] - Datasheet Encoder Motorola: MC145026 - http://katalog.elektroda.net/download

[11] - Datasheet módulos RR3 e RT4 – www.telecontrolli.com

## 8 – Bibliografia Complementar


Microeletrônica - Kenneth C. Smith e Adel S. Sedra. - Ed. Makron Books, quarta edição.

Datasheet Encoder Motorola: MC145026 - http://katalog.elektroda.net/download

Datasheet Decoder Motorola: MC145027 - http://katalog.elektroda.net/download

Datasheet Amplificador Operacional Texas Instruments: OPA134 / OPA2134 / OPA2604 - www.ti.com

Datasheet Componentes Lógicos Texas Instruments: CD4532B / SN54ALS138A - www.ti.com

Datasheet Potenciômetro Digital Analog Devices: AD5228 - www.analogdevices.com

Revista Áudio Música & Tecnologia – Edições Diversas

Revista Backstage – Edições Diversas

Apostila do Curso de Sistemas de Audio para Ambientes Internos e Externos - Carlos Pedruzzi, Rio Música, 1999.

Artigos técnicos de autoria de Rui Monteiro - www.studior.com.br

Forum de Discussão sobre Audio - www.audiolist.cjb.net

Artigos técnicos e FAQ, vários autores - www.audiolist.cjb.net

Site com projetos de Audio - www.republika.com

Site com projetos de Audio - www.sound.au.com

Site de fabricantes de sistemas de Áudio: www.mackie.com / www.soundcraft.com / www.Behringer.com / www.rane.com / www.hotsound.com.br / www.jblpro.com