

NOVO SISTEMA PARA MEDIÇÕES ACÚSTICAS

Swen Müller

Laboratório de Ensaios Acústicos do INMETRO

e-mail: smuller@inmetro.gov.br

Resumo: Medições na área de acústica hoje em dia podem ser conduzidas facilmente com qualquer computador. Na maioria das vezes, as placas de som embutidas neles oferecem qualidade razoável, e como opção adicional, existem inúmeros conversores AD/DA externos com qualidade superior para gravações digitais. Porém, no dia-a-dia de medições, o usuário logo esbarra em dificuldades utilizando tais dispositivos comuns. Por exemplo, a captação de respostas impulsivas de salas requer, além do conversor AD/DA, um amplificador de potência e um pré-amplificador com fornecimento para os microfones. A fiação entre essas caixas é sujeita a erros e os níveis absolutos, cujo conhecimento é crucial para a elaboração de medições calibradas, difíceis a avaliar. Essas dificuldades e a falta de conforto levaram à concepção de um "frontend" de medições com todas as funções necessárias já embutidas: conversores AD/DA com conexão a desktops e notebooks, pré-amplificador com ganho chaveável em passos precisos, amplificador de potência eficiente e fonte universal chaveada. O controle de todas as funções é exercida pelo computador, o que facilita a obtenção de resultados corretos em todos os modos de operação, já que todos os ganhos ao longo do caminho do sinal sempre são conhecidos.

1. INTRODUÇÃO

Na área de metrologia, o que pode ser observado há algum tempo é uma integração cada vez maior do computador como peça central da instrumentação. Antigamente, os analisadores para propósitos específicos eram trambolhas caríssimos que só serviram para um único propósito. Com o surgimento dos microcomputadores, esses aparelhos passaram a ter interfaces embutidos para transferir os resultados dos ensaios ao computador, onde eles podem ser processados e preparados para a apresentação.

Hoje em dia, o poder de cálculos dos computadores é tamanho que o próprio processamento de sinais pode ser feito neles. Assim, com uma placa de conversores AD/DA, o computador pode se transformar num poderoso analisador que substituí equipamento dedicado, outrora caríssimo.

A tecnologia de medições de função de transferência com base em varreduras foi implementada exatamente desse jeito. Um programa que roda no PC gera e emite o sinal de excitação e capta a resposta do dispositivo a ser ensaiado, e em seguida executa todo o processamento necessário. Finalmente apresenta os resultados na tela ou os armazena no disco.

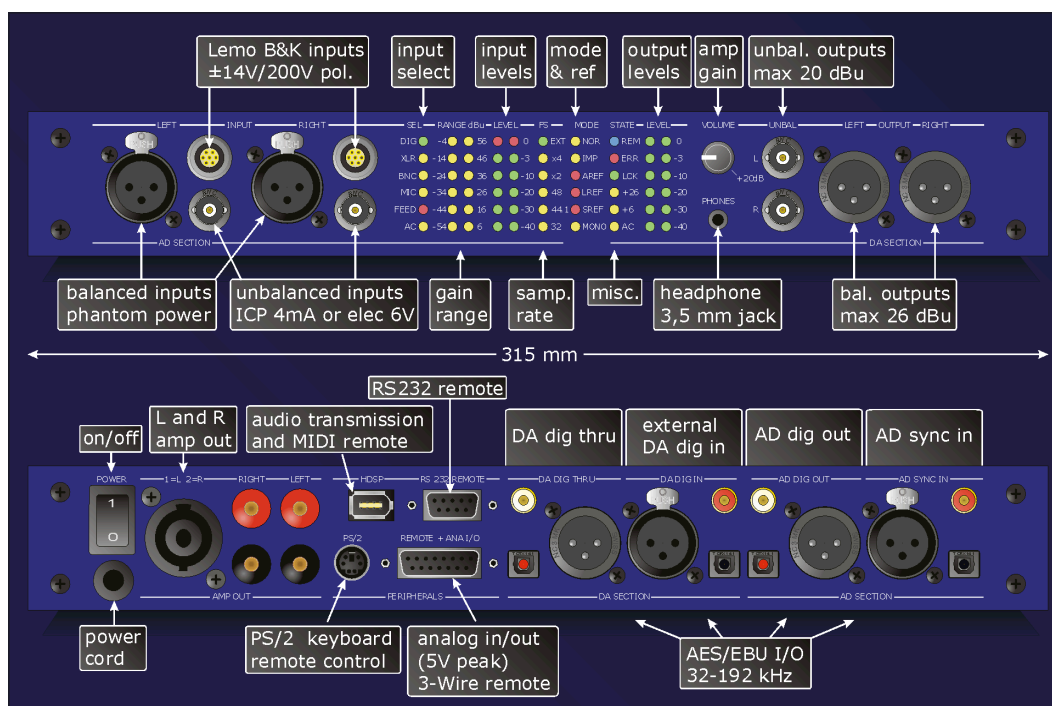


Figura 1: Painéis dianteiro e traseiro do sistema de medições (desenho).

Mas o âmbito das aplicações não se restringe só à avaliação de respostas em frequência de transdutores (microfones, alto-falantes, acelerômetros). Por exemplo, testes de inteligibilidade em escolas públicas executados pelo laboratório de acústica do INMETRO também foram conduzidas inteiramente desse jeito.

No entanto, a parafernália de equipamentos necessária para esses tipos de ensaio complica a execução dos mesmos. Adicionalmente, a fiação entre os aparelhos pode levar a erros, como já aconteceu várias vezes em ensaios cuja característica muitas vezes é a pressa com a qual eles têm que ser preparados e consumados. Tais ensaios sempre precisam de três componentes básicos, além dos microfones e alto-falantes:

- 1) Pré-amplificador de microfone e condicionador de sinais.
- 2) Amplificador de potência para fornecer o sinal de excitação ao alto-falante.
- 3) Analisador “stand-alone”, ou, no caso de processamento num computador como proposto aqui, placa com conversores AD/DA para tornar analógico o sinal de excitação gerado pelo computador, e simultaneamente digitalizar os sinais dos microfones.

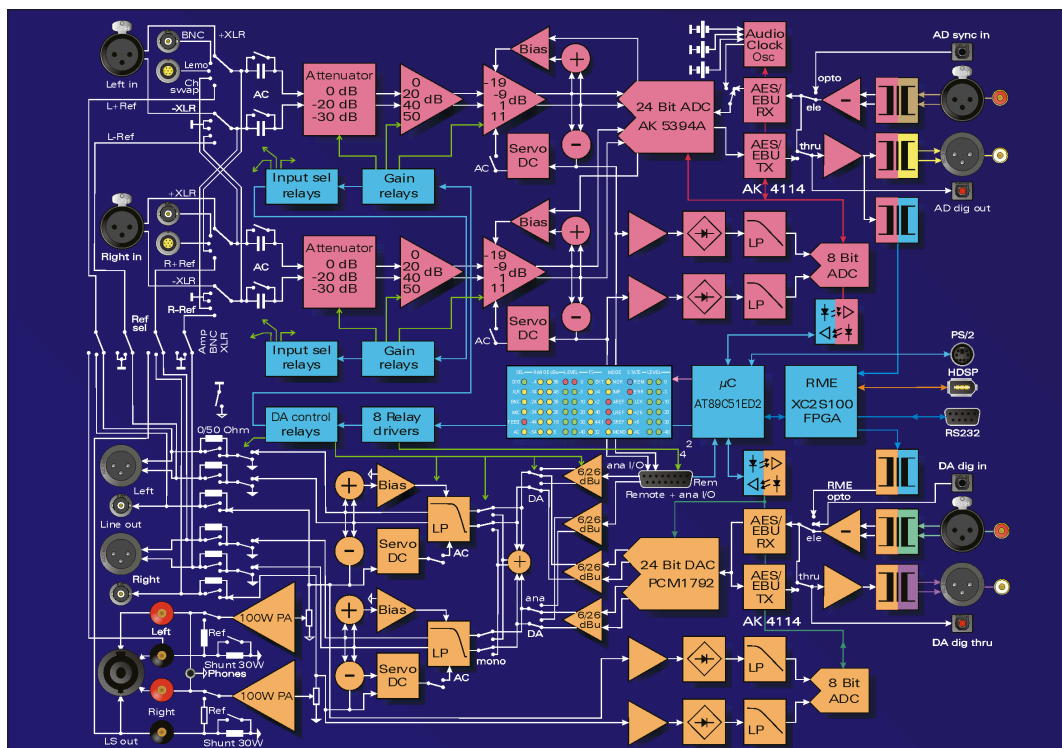


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de medições

Foi assim que nasceu o desejo da disponibilidade de um único aparelho que integra todas as funções necessárias na área das medições acústicas e de vibrações e que permite a ligação direta de quaisquer microfones, acelerômetros, alto-falantes ou equipamentos de laboratório e de áudio profissional. Como exemplo, as Figura 3 e Figura 4 mostram um arranjo típico para medições em salas de aula para a avaliação da qualidade acústica das mesmas.

O arranjo na Figura 3 já conta com um condicionador de sinais especializado que integra a função de pré-amplificador de microfones e amplificador de potência para o fornecimento de energia ao alto-falante. No entanto, não contém conversores AD/DA para a ligação ao computador. Essa função é suprida por outro aparelho que é conectado ao computador mediante uma conexão de áudio digital padronizado, o chamado formato AES/EBU. O controle remoto do condicionador de sinais é realizado por uma ligação separada através da porta paralela do computador. Infelizmente, a qualidade do pré-amplificador não é suficiente para alguns tipos de ensaio e não permite a conexão de microfones de laboratório com voltagem de polarização de 200 V. Além disso, o amplificador de potência é fraco para muitos ensaios.

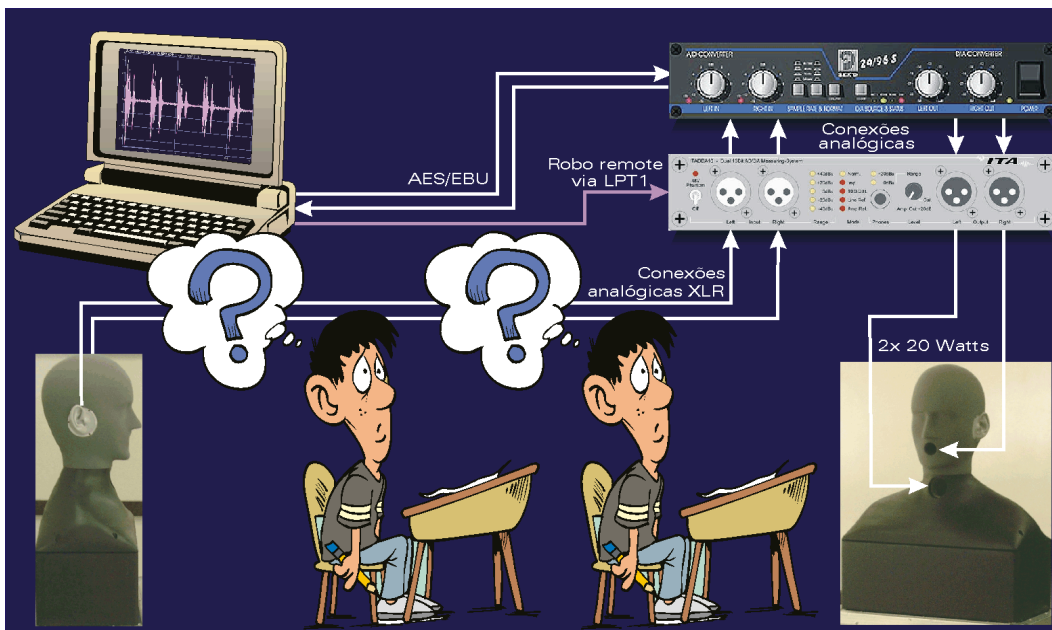


Figura 3: Arranjo para medições da inteligibilidade da palavra e das propriedades acústicas de salas de aula mediante equipamento já existente.

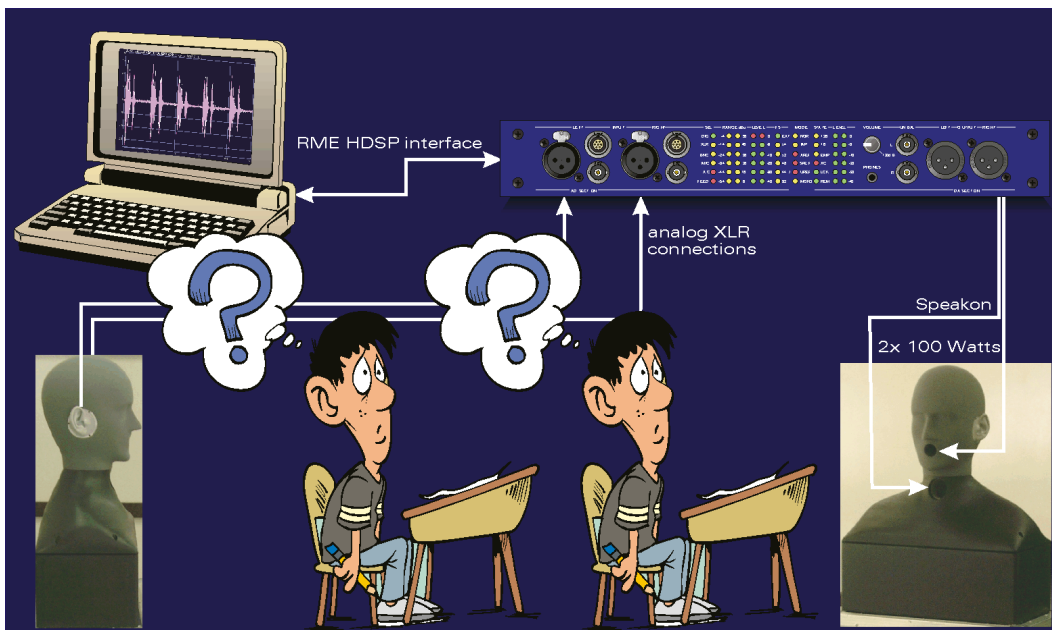


Figura 4: O arranjo como será com o novo sistema de medições proposto. Um único aparelho integra todas as funções necessárias para a execução da tarefa.

2. REQUISITOS DO NOVO SISTEMA SENDO DESENVOLVIDO

As desvantagens do equipamento datado levaram a uma série de requisitos a serem cumpridos por um novo sistema universal de medições na área de acústica. Este novo sistema a ser desenvolvido deve atender às necessidades de todas as três divisões do laboratório de Acústica do INMETRO e igualmente ter serventia para outras áreas de medições de áudio.

Segue uma lista de aplicações típicas em laboratórios de acústica e vibrações que poderão ser supridas inteiramente pelo novo sistema de medições:

- Medição do nível de pressão sonora e análise de quaisquer sinais acústicos.
- Medição da função de transferência de alto-falantes.
- Medição do coeficiente de absorção para incidência aleatória pelo método tradicional na câmara reverberante.
- Medição do coeficiente de absorção para incidência normal pelo método tradicional em tubo de impedância e pelo método in-situ aplicado pelo colega Paulo Massarani.

- Medição do isolamento de cabines, e em geral do isolamento entre quaisquer ambientes acústicos.
- Medição de respostas impulsivas de salas e avaliação do tempo de reverberação e dos parâmetros acústicos de quaisquer ambientes.
- Testes de inteligibilidade com gravação binaural simultânea.
- Medições da sensibilidade de microfones pelos métodos de comparação e de reciprocidade, em campo livre, campo de pressão ou em atuador eletrostático.
- Verificação de aparelhos audiométricos, medição do caminho acústico com mastóide.
- Medição da resposta em frequência de pré-amplificadores, medidores de pressão sonora, filtros e quaisquer outros dispositivos que processam sinais de áudio.
- Medição do ruído de fundo e da faixa dinâmica de amplificadores e outros equipamentos.
- Medição de potência acústica para a outorga do “Selo Ruído” a aparelhos eletrodomésticos.
- Medição da resposta em frequência de acelerômetros pelo método de comparação com *shaker*. Como a resposta abaixo da faixa de áudio é de interesse, o novo sistema deve ser capaz de lidar com frequências subsônicas, de preferência com opção de acoplamento DC.
- Medições de vibrações em materiais sólidos pelo método tradicional (análise FFT de dois canais) e pelo método de respostas impulsivas.
- Medição da resposta de caixas de som e sistemas de sonorização.
- Medição da diretividade de caixas de som com a ajuda de mesas giratórias.
- Medição da pressão sonora máxima de alto-falantes em função da frequência e do teor de distorção máximo estipulado.
- Medição simultânea da resposta em frequência e dos harmônicos de alto-falantes.
- Medição de distorção e intermodulação.
- Medição da impedância complexa de alto-falantes.
- Gravações gerais ao disco rígido com as taxas de amostragem comuns na área de áudio (32, 44.1, 48, 96, 192 kHz).
- Reproduções de alta qualidade de arquivos de áudio através do amplificador de potência embutido para apresentações.

Para resumir, a grande maioria das tarefas comumente executadas em laboratórios de acústica pode ser acudida pelo novo sistema a ser desenvolvida, dispensando outros equipamentos externos, fora os transdutores e o computador. Como o novo sistema disporá de um interface para o qual existem *drivers* para os sistemas operacionais mais comuns (*Windows*, *Linux* e o *OS-X* da Apple), os softwares já desenvolvidos para os equipamentos em uso agora (por exemplo *setups* do *Labview*, que está sendo amplamente usado na área de instrumentação e medição) podem continuar a ser utilizados com poucas modificações. Novas aplicações poderão ser desenvolvidas facilmente nas plataformas prediletas dos usuários (por exemplo, o onipresente *Matlab*), devido ao uso universal e à possibilidade de controlar todas as funções do sistema mediante o computador.

3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÕES

Levando em consideração as demandas de todos os usuários e os pré-requisitos dos vários procedimentos metrológicos levou às seguintes características do *frontend* de medições:

- Tamanho de um laptop comum para poder transportá-lo na pasta dele.
- Sistema de dois canais.
- Entradas e saídas analógicas no painel dianteiro, entradas e saídas de áudio digital no painel traseiro.
- Ligação dos sinais de entrada e saída ao computador mediante três meios fundamentais:
 - 1) Conexão analógica com 5V *full scale* a qualquer placa de som. Essa possibilidade garante que o sistema pode ser utilizado em conjunto com qualquer computador com placa de som, mesmo sem interface especializado. Porém, não é o uso preferível pois o ponto forte do sistema é o emprego de conversores AD/DA de altíssima qualidade. Em contrapartida, os conversores de placas de som embutidos nos computadores geralmente têm qualidade deplorável.
 - 2) Conexão digital no formato AES/EBU ou SP/DIF, respectivamente. Essa possibilidade constitui uma transmissão dos sinais com qualidade superior em relação à conexão analógica, já que os conversores internos do sistema têm uma faixa dinâmica superior à da qualquer placa de som. A conexão em ambas as direções pode ser estabelecida de modo

elétrico, com ligação simétrica via plug XLR, ou assimétrica via plug RCA, ou de modo ótico, via conector TOSLINK.

- 3) Conexão via interface proprietário da empresa de áudio RME. Essa é a conexão mais versátil porque permite transferir os sinais digitalizados e no mesmo tempo os dados do controle remoto concomitantemente via um só cabo do tipo *firewire*. Os interfaces disponíveis são uma placa PCI para uso em gabinetes *desktop* e uma placa *cardbus* para uso em laptops, com as mesmas características. Elas funcionam com base em DMA (Direct Memory Access), um modo seguro que transfere os dados de/para a memória do computador sem auxílio da CPU.

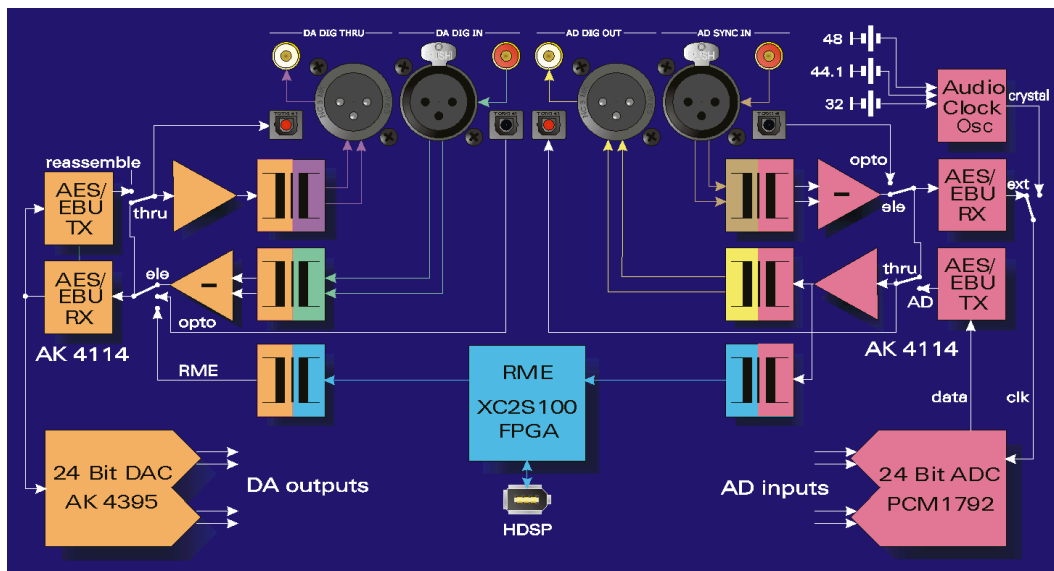


Figura 5: Amplas possibilidades de conexões digitais de áudio do sistema de medições

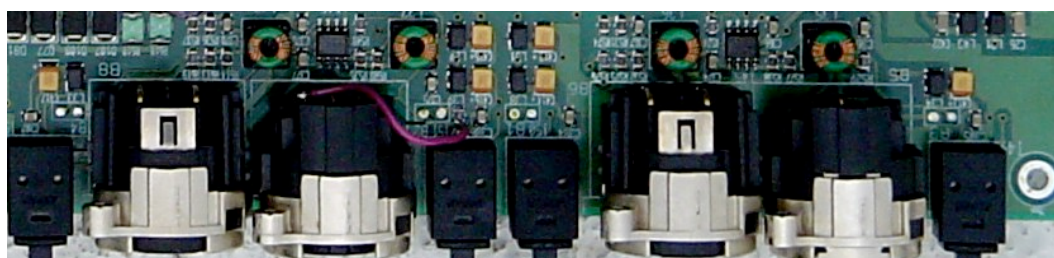


Figura 6: Conexões digitais no placa mãe do protótipo

- Controle remoto completo de todas as funções pelo PC através de um amplo leque de opções: RS232, porta paralela, teclado PS/2, *channel status* da conexão AES/EBU, Midi pelo interface Hammerfall DSP da RME.
- Compatibilidade com um velho sistema de medições mediante conector do tipo *sub min D* de 15 pinos. Esse conector aceitará os sinais analógicos com os mesmos níveis e nos mesmos pinos. Adicionalmente também aceita o formato de controle remoto do velho sistema. Isso significa que as velhas placas AD/DA de 16 bits poderão continuar a ser utilizados com o novo sistema.
- Indicação do estado de operação e dos níveis nas entradas e saídas analógicas por uma matrix de 60 LEDs no painel dianteiro.
- Conversores AD/DA da última geração com capacidade de 192 kHz de frequência de amostragem e faixa dinâmica superior a 117 dB.
- Separação galvânica total entre seção AD, seção DA, e ainda entre essas duas seções e o interface ao computador para evitar interferência por *ground loops* e perigo de queima de equipamentos em casos de acidentalmente ligar tensão da rede elétrica às entradas ou saídas.
- Fonte chaveada universal com pré-estágio PFC para a alimentação das várias secções com tensão da rede de 90 a 260 volts para economizar peso, cumprir futuras normas da comunidade europeia e fornecer energia suficiente ao amplificador de potência embutido.
- Fornecimento *Phantom* (48 V) para microfones de estúdio
- Fornecimento da voltagem de polarização (200V com alta exatidão) e da alimentação do pré-amplificador ($\pm 14V$) de microfones capacitivos de laboratório.

- Fornecimento de corrente constante (4 mA regulado com alta precisão) para acelerômetros do tipo ICP empregados na área de vibrações.
- Fornecimento de uma voltagem de 6V para alimentar microfones eletretos.
- Ampla faixa de sensibilidade chaveada na entrada (-54 dBu..56 dBu, isso é uma faixa de 110 dB. 0 dBu corresponde a 775 mV RMS). Ganho mudável em passos de 10 dB, chaveados por relays e resistores de 0,1 % de tolerância) na entrada para a aceitação dos sinais mais fracos de transdutores dinâmicos até os sinais de saída dos amplificadores mais poderosos no mercado (com voltagem de saída em excesso de 200 Volts RMS).
- Processamento de sinais inteiramente simétrico, entrada e saída XLR. Opção de conexão de dispositivos assimétricos mediante conectores do tipo BNC.
- Opção modo *mono paralelo* na entrada, ligando o sinal de uma entrada aos dois pré-amplificadores. Proveitoso em medições de baixíssimos sinais, pois permite diminuir o ruído de fundo em 3 dB. Para essa opção, o software tem que adicionar os dois sinais oriundos do conversor AD.
- Opção *channel swap* na entrada, trocando os canais esquerdo e direito. Útil para alguns ensaios que demandam a troca dos canais para aumentar a precisão dos resultados.
- Acoplamento AC ou DC, mutável com relays, nos circuitos da entrada e da saída.
- Primeiro estágio de pré-amplificação com amplificador operacional LT1115 de baixíssimo ruído de fundo (0.95 nV/√Hz). Isso garantirá um ruído de fundo consideravelmente (10 dB) menor do que o do venerado pré-amplificador da B&K comumente utilizado (BK2636) para amplificar sinais de microfones.

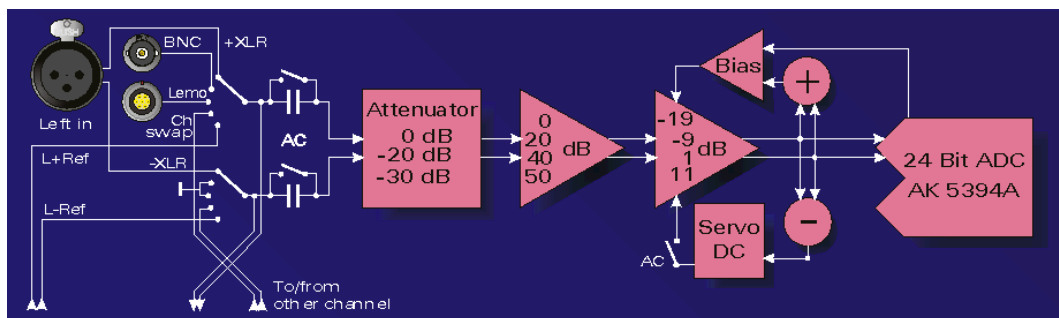


Figura 7: Diagrama de blocos do pré-amplificador e possibilidades de chaveamento na entrada

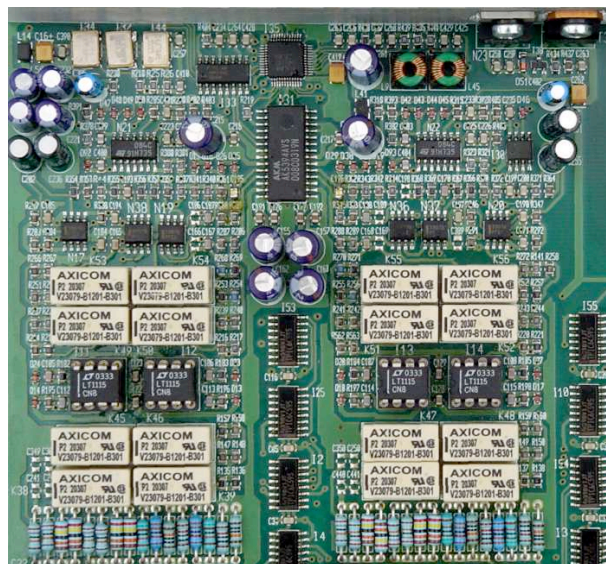


Figura 8: Pré-amplificadores, conversor AD, transmissor AES/EBU e osciladores para a geração da frequência de amostragem na placa mãe

- Modo *mono* na saída, somando os dois canais do conversor DA. Útil para medições de intermodulação, pois as duas frequências envolvidas não podem intermodular no conversor DA, já que eles saem dele separadamente no canal esquerdo e direito e só estão sendo somados analogicamente no último estágio. Além disso, um ganho de 3 dB na faixa dinâmica é obtido.
- Conexão automática das saídas às entradas nas medições de referência, escolha de referência simétrica ou assimétrica.

I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical

- Voltagem de referência (5V) com exatidão de 0.02% para a auto-calibração da seção de entrada.
- Impedância da saída mutável entre 50 Ohms e 0 Ohms. A última opção é importante em medições de alta exatidão, porque impede qualquer queda da voltagem na saída quando conectando o dispositivo a ser ensaiado. Porém, pode levar a instabilidades quando cabos cumpridos estão acoplados à saída.
- Amplificador estéreo de potência para a conexão direta de alto-falantes. Será implementado um design com alta potência (2x 80W RMS contínuo) e eficiência melhorada (class-H), utilizando duas bitolas de voltagem de alimentação ($\pm 17V$ e $\pm 34V$) fornecidos pela fonte chaveada. Isso permite reduzir um pouco a dissipação de calor.
- Dispositivo para medir a impedância complexa de alto-falantes, composto por um resistor *shunt* de 1 Ohm e um resistor de referência de 10 Ohms, ambos com 1% de tolerância e capacidade de 30 watts.

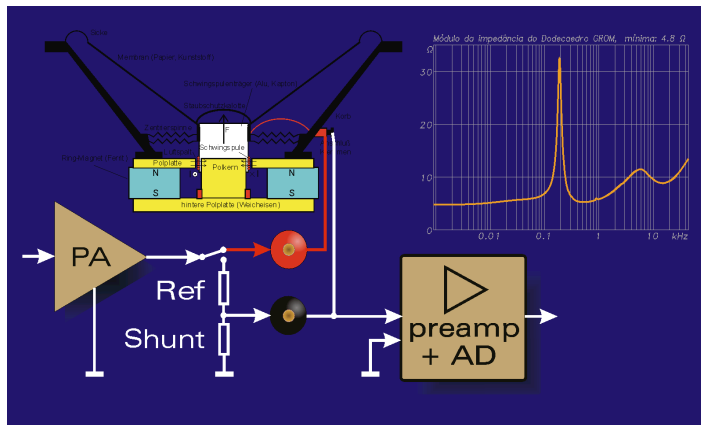


Figura 9: Princípio da avaliação da impedância de um alto-falante com o sistema de medição

- Conector de alto-falantes *Speakon* e *bornes*.
- Conector de fones de 3,5 mm, volume ajustável com potenciômetro.
- Microprocessador AT89C51ED2 da Atmel para o controle de todas as funções do sistema, com memória não-volátil para armazenar o último estado de operação.

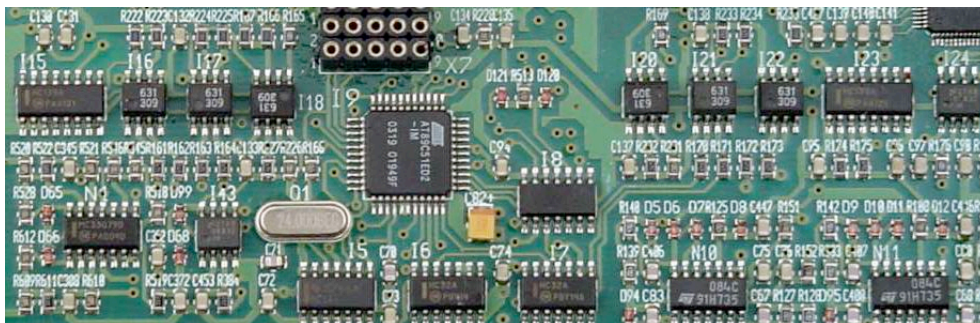


Figura 10: Parte do microprocessador na placa mãe

- Relais de miniatura do tipo biestável com capacidade de conduzir 2x 2 Ampères. Eles só consomem energia na hora de chavear (um pulso de meramente 10 milissegundos), o que reduz consideravelmente a corrente consumida e evita aquecimento desnecessário do sistema.
- Placa mãe com 4 camadas de cobre, espessura 70 μm cada uma. Componentes do tipo SMD (*surface mount devices*) com algumas exceções (relais, semicondutores de potência, capacitores eletrolíticos, resistores de potência).

4. ESTADO ATUAL

O funcionamento da maior parte do segundo protótipo do circuito já foi checado. Tempo considerável foi gasto com a inauguração e o aperfeiçoamento da nova fonte chaveada, um circuito intrincado, composto por dois blocos intergrais:

- bloco PFC (Power Factor Control), que transforma a tensão da rede que pode variar entre 90 e 260 V RMS em uma tensão DC quase constante de 380 V e ainda garante uma corrente de

consumo quase senoidal, em fase com a tensão da rede, minimizando desta maneira a poluição da rede elétrica com harmônicos de 60 Hz.

- bloco meia-ponte em ressonância que gera todas as tensões secundárias com uma frequência de chaveamento de aproximadamente 130 kHz.

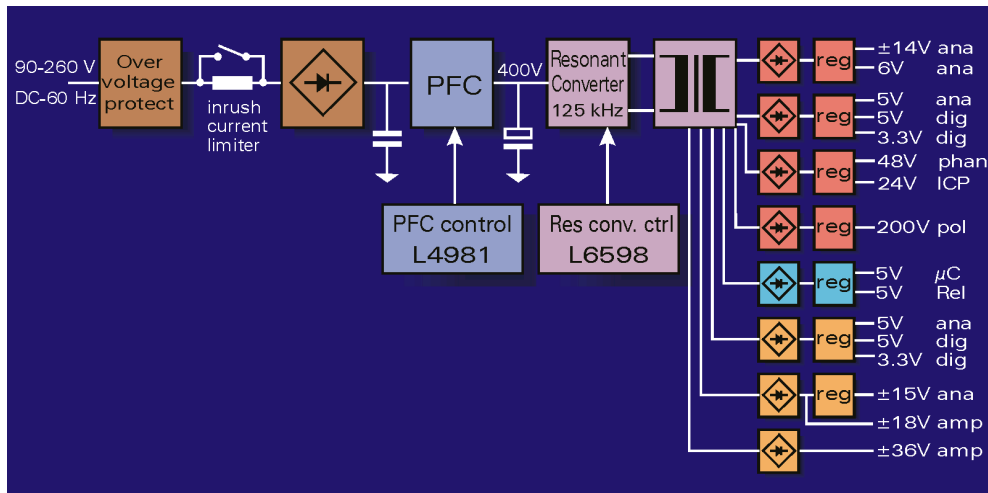


Figura 11: Diagrama em blocos da fonte chaveada

Os dois blocos são sincronizados, quer dizer trabalham com a mesma frequência de chaveamento, assim minimizando interferência no circuito sensível do pré-amplificador. O conversor meia-ponte em ressonância é o gerador da frequência.

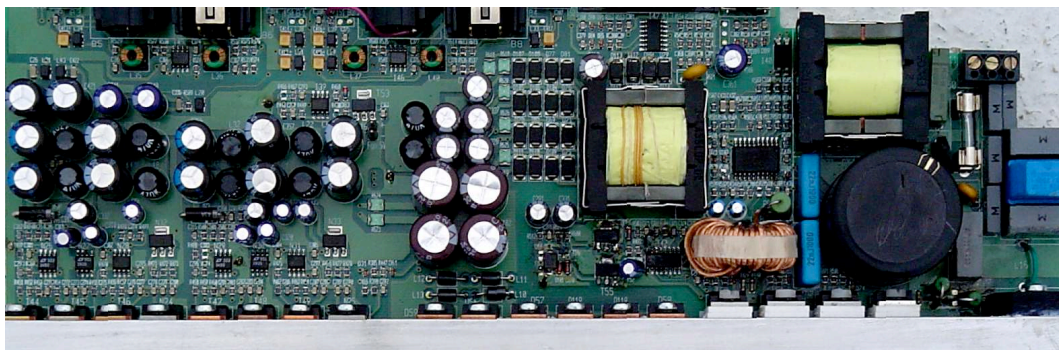


Figura 12: Seção da fonte chaveada na placa mãe do sistema de medições

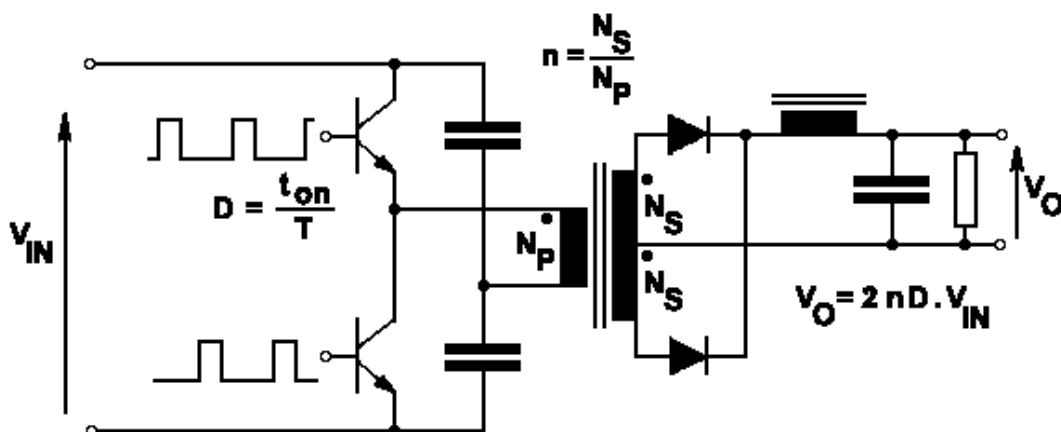


Figura 13: Fonte chaveada em topologia meia-ponte.

4.1. Amplificador de potência classe H

O amplificador é uma parte integral do sistema. É basicamente por causa dele que se optou pela fonte chaveada, além da flexibilidade de ligar o sistema à qualquer rede elétrica no mundo com tensões que podem variar entre 90 e 260 Volts. Um transformador convencional teria sido grande demais para as dimensões restritas do sistema e teria adicionado bastante peso, frustrando o uso cômodo como sistema de medições portátil.

Outro problema é a geração de calor, que normalmente requer um dissipador grande. Para diminuir o calor, existem várias técnicas, das quais a chamada “class-H” foi implementada. Essa técnica trabalha com duas ou mais bitolas de voltagem. Quando o sinal de áudio é pequeno, a bitola de voltagens mais baixas é fornecido ao circuito do amplificador. Quando a amplitude do sinal ultrapassa um certo limite, a segunda bitola com voltagem mais alta é fornecida ao circuito do amplificador.

Com essa técnica, a potência de perda, ou seja, o produto da corrente vezes a voltagem entre saída e bitola diminui consideravelmente. A eficiência pode chegar a 60%.

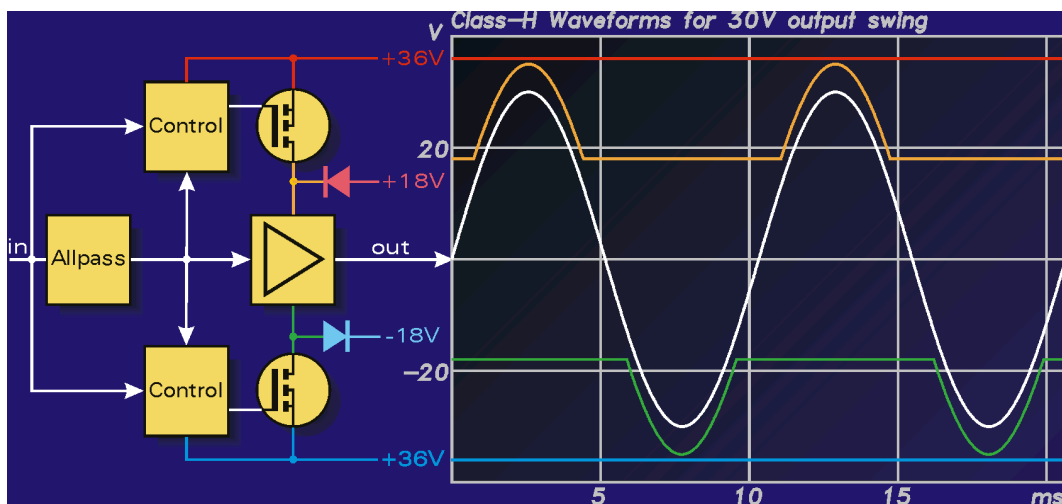


Figura 14: Princípio de funcionamento do amplificador com duas bitolas de voltagem de fornecimento

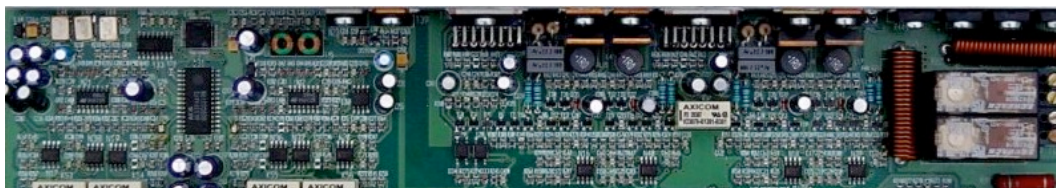


Figura 15: Amplificador na placa mãe (lado direito)

O funcionamento do chaveamento da segunda bitola já foi verificado. No primeiro protótipo, esse chaveamento ainda apresentou problemas de estabilidade que resultou em oscilações de alta frequência. No segundo protótipo, esse problema foi resolvido com um filtro composto por um indutor e um capacitor em série com um resistor nas linhas de alimentação do amplificador. As desestabilidades desapareceram e o circuito funciona satisfatoriamente até em altas frequências (até 50 kHz).

4.2. Interface de conexão ao computador

A interface para a conexão ao computador é uma peça-chave do novo sistema de medições. Se trata do núcleo de um sistema comercial de áudio de multi-pista, o sistema Hammerfall DSP da empresa RME. A tecnologia foi gentilmente concedida pela empresa para o uso neste sistema de medições, já que não constitui um produto de concorrência, pois os produtos da RME são mais voltados para o mercado dos músicos e áudio profissional e não para uso em laboratórios primários. O coração do interface é um FPGA (Field programmable Gate Array), um CI com altíssima complexidade que pode ser livremente programado para exercer qualquer função.

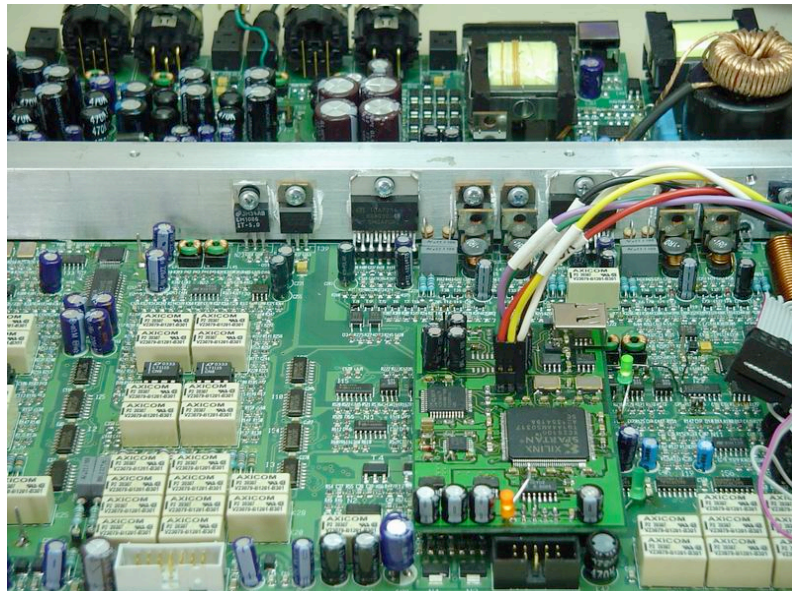


Figura 16: Pequena placa (com LED cor-de-laranja): Interface de áudio digital e controle remoto no padrão HDSP da RME

4.3. Controle remoto

Já existe um programa rudimentar para o microprocessador para lidar com as tarefas extensas de administração dos recursos do sistema, escrito por um colega do laboratório. Além disso, ele instaurou um programa de controle remoto no *Labview*, programa bastante utilizado na área de instrumentação. Rotinas particulares para o programa tradicional de medições *Monkey Forest* também já são implementadas.

O programa que roda no microprocessador continuará a ser desenvolvido, ainda faltam muitas partes tais como chaveamento da taxa de amostragem, controle da velocidade do ventilador através da temperatura medida em dois lugares, e controle remoto opcional mediante um teclado de PC comum ligado ao sistema.

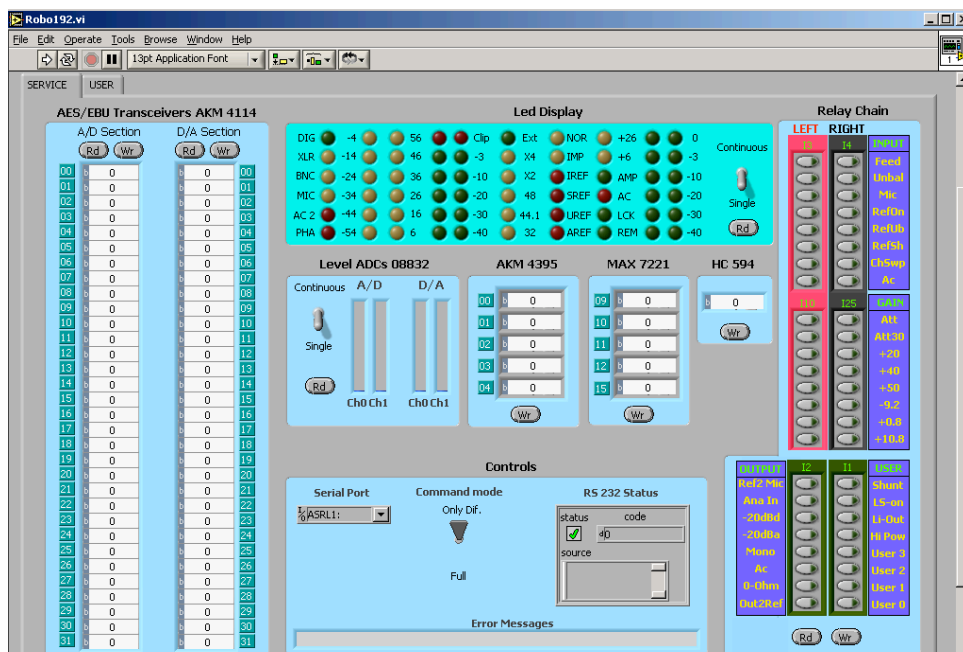


Figura 17: Interface de controle remoto do Labview, escrito por Nelson Melo de Espírito Santo

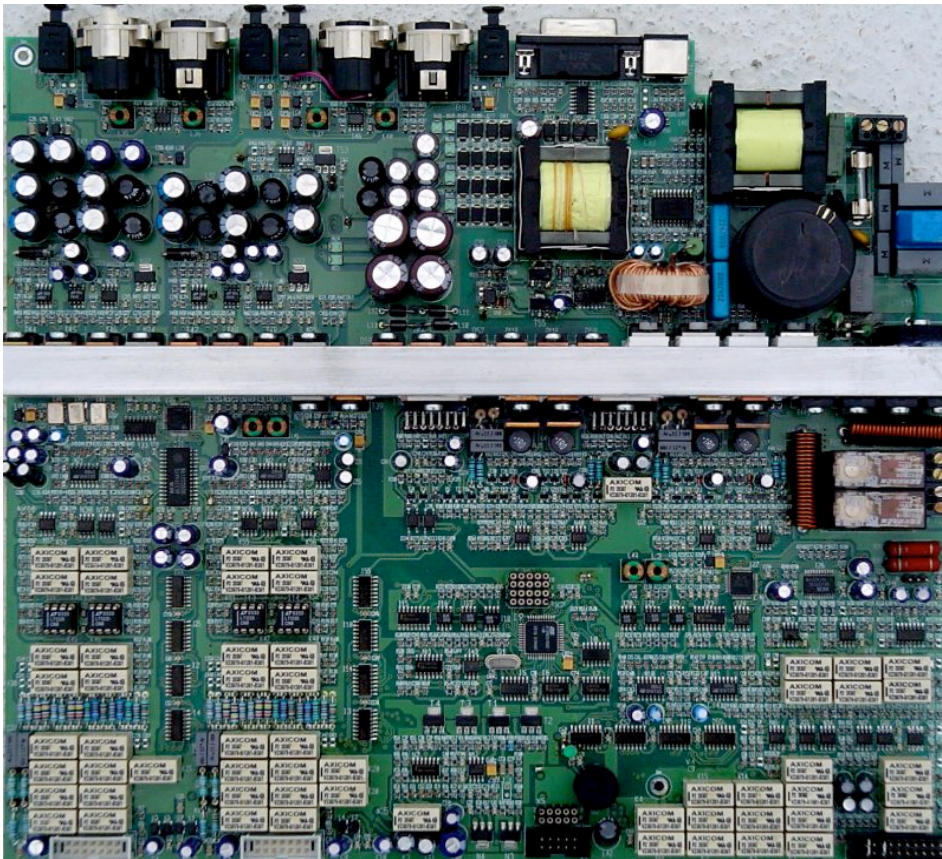


Figura 18: Vista da placa mãe do segundo protótipo

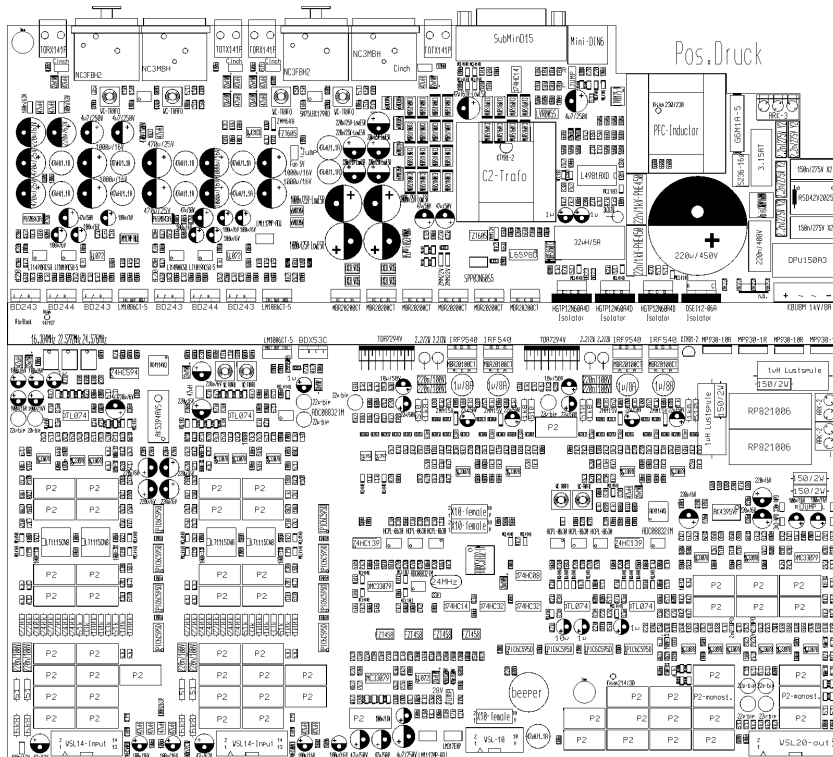


Figura 19: Plano dos componentes no segundo protótipo do sistema de medições.