

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



GUILHERME CAMPOS NEUKAMP

MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DA BOBINA DO
ALTO-FALANTE EM TESTE

Canoas, Dezembro de 2008



GUILHERME CAMPOS NEUKAMP

**MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DA BOBINA DO
ALTO-FALANTE EM TESTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica

Área de Concentração

Professor Orientador:

MSc. Eng. Eletr. Paulo César Cardoso Godoy – CREA-RS: 11.682-2

Canoas

2008



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: Guilherme Campos Neukamp

Matrícula: 022006411-3

Título: Monitoramento da Temperatura do Alto-Falante em Operação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

MSc. Eng. Eletr. Paulo César Cardoso Godoy

CREA-RS: 11.682-2

Banca Avaliadora:

MSc. Eng. Eletr. Augusto Alexandre Durgante de Mattos

CREA-RS: 88.003-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. Dalton Vidor

CREA-RS: 79.005-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor

Guilherme Campos Neukamp

Orientador

Paulo César Cardoso Godoy

Avaliador

Augusto Alexandre de Mattos

Avaliador

Dalton Vidor

Relatório Aprovado em:



DEDICATÓRIA

Dedico à minha família.



AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Renato Lívio Neukamp e Maria da Glória Neukamp, pelo suporte dado para que eu pudesse chegar à conclusão, não somente deste trabalho, mas também a mais uma importante etapa na minha vida.

À minha namorada, melhor amiga e futura Designer Fernanda Nicole Oliveira, pelo apoio e paciência nesta etapa final da graduação.

Ao Engenheiro e Professor Homero Sette pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas Engenheiros Rogério Volcan, Eliézer Knob, Rodrigo Brandt e Gilberto Nunes pelas sugestões, observações e principalmente pelo apoio durante todo o decorrer do curso.

Ao Professor Paulo César Cardoso Godoy pelas valiosas contribuições.

Agradeço a todos colaboradores da Eletrônica Selenium que me auxiliaram na realização deste trabalho. Em especial aos engenheiros Acir Ozelame, Guilherme Haas e Felipe Luz, ao futuro engenheiro e bacharel em sistemas de informação Rodrigo Righi, ao Galeão, Renan, Levi e Geogenes.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo durante meu período de graduação, que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho e que ainda continuarão me auxiliando na busca de novos e desafiadores objetivos.



“O mundo precisa de mais gênios humildes! Hoje em dia somos poucos...”

Autor desconhecido



RESUMO

NEUKAMP, Guilherme Campos. **Monitoramento da Temperatura da Bobina do Alto-Falante em Teste**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. Ano do Trabalho.

O superaquecimento da bobina móvel é um dos principais responsáveis pelos danos ocorridos nos alto-falantes. Na maioria das vezes, são falhas catastróficas ou defeitos que comprometem sensivelmente a sonoridade final desejada pelo usuário. O presente trabalho tem por objetivo fazer uma análise deste fenômeno, monitorando a temperatura durante os testes de potência, permitindo ao técnico responsável pelo desenvolvimento do produto, ter informações importantes para aferir e aprimorar a qualidade do alto-falante. O monitoramento do sistema será feito através de um microcontrolador, que receberá a informação da tensão aplicada no circuito da bobina móvel e efetuará os cálculos necessários para relacioná-la a temperatura da bobina.

Palavras chave: Microcontrolador. Programação. Alto-Falante.



ABSTRACT

NEUKAMP, Guilherme Campos. **Voice Coil Heat Measurement at Power Test**. Work of Conclusion of Course in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2008.

The voice coil overheat is one of the major causes for the damages occurred in the loudspeakers. In most of the cases, they are catastrophic failures or permanent damage that affects perceptibly the final sonority desired by the user. The present paper has the objective to analyze this physical phenomenon, checking the temperature during power tests and allowing the engineer in charge of the product development to have important information to improve the loudspeaker quality. The system monitoring will occur through a microcontroller that will receive the voltage information applied in the voice coil circuit and will make all the necessary calculus to relate it to the coil heat.

Keywords: Microcontroller. Programming. Loudspeakers.



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fonógrafo de Edson (diafragma ligado à corneta).....	3
Figura 2 – Componentes do Alto-Falante em corte	4
Figura 3 – Curvas de Impedância e Fase de um Alto-Falante ao ar livre	7
Figura 4 – Componentes Não-Lineares Red e XLe.....	9
Figura 5 – Condução do ar entre a bobina e o conjunto magnético.....	10
Figura 6 – Convecção forçada no alto-falante	11
Figura 7 – Gráfico demonstrativo dos valores medidos	13
Figura 8 – Espectro do Ruído Rosa em escala Logarítmica	15
Figura 9 – Diagrama de blocos do setup de medição, para aplicação da norma NBR 10303	16
Figura 10 – Função de transferência do filtro usado na norma NBR 10303.....	17
Figura 11 – Diagrama de blocos estrutural do projeto	18
Figura 12 – Circuito analógico de potência.....	19
Figura 13 – Filtro passa-alta	20
Figura 14 – Circuito analógico simplificado	20
Figura 15 – Simulações com software Multisim 10.....	21
Figura 16 – Layout da placa feito no software Ultiboard 10	22
Figura 17 – Vista 3D da placa projetada.....	22
Figura 18 – Etapa de corrosão da placa fenólica.....	23
Figura 19 – Placa finalizada em funcionamento	23
Figura 20 – Configuração Microcontrolador PIC16F877A	26
Figura 21 – Configuração MAX232.....	27
Figura 22 – Configuração Conversor D/A.....	29
Figura 23 – Configuração do TL084.....	30
Figura 24 – Esquema elétrico TL084	30
Figura 25 – Circuito regulador utilizando o LM7805	31
Figura 26 – Fonte simétrica $\pm 15V$	31
Figura 27 – Esquema elétrico etapa de aquisição	1
Figura 28 – Montagem em placa padrão.....	34



Figura 29 – Ambiente de programação CCS	35
Figura 30 – Software Idéia1.....	36
Figura 31 – Ambiente do HyperTerminal	37
Figura 32 – Bobinas de alumínio e cobre.....	39
Figura 33 – Teste de aferição.....	39
Figura 34 – Gerador de ruído Neutrik	40
Figura 35 – Amplificador StudioR.....	40
Figura 36 – Erro relativo Bobina de Alumínio.....	41
Figura 37 – Erro relativo Bobina de Cobre.....	41
Figura 38 – Comparativo 12SW14A.....	42
Figura 39 – Erro Relativo 12SW14A	43
Figura 40 – Comparativo 6TR4A.....	43
Figura 41 – Erro Relativo 6TR4A	44
Figura 42 – Comparativo 6W4P.....	45
Figura 43 – Erro Relativo 6W4P	45



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das Bobinas Utilizadas.....	12
Tabela 2 – Valores medidos no experimento.....	13



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- GAP: Espaço onde se localiza a bobina.
- DC: Tensão contínua.
- AF: Alto-Falante.
- AWG: *American Wire Gauge*.
- NBR: Norma Brasileira.
- AES: *Audio Engineering Society*.
- CPU: *Central Processing Unit*.
- RAM: *Random Access Memory*.
- ROM: *Ready Only Memory*.
- PROM: *Programmable Ready Only Memory*.
- EPROM: *Erasable Programmable Ready Only Memory*.
- EEPROM: *Electrically-Erasable Programmable Ready Only Memory*.
- UART: *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*.
- USART: *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*.
- ULA: Unidade Lógica Aritmética.
- CCP: *Capture, Compare e PWM*.
- RTC: *Real-time Clock*
- PWM: *Pulse Width Modulator*.
- ADC (A/D): *Analog-to-digital Converter*.
- DAC (D/A): *Digital-to-analog Converter*.
- LSB: *Least Significant Bit*.
- MSB: *Most Significant Bit*.
- CI: Circuito Integrado.
- SPI: *Serial Peripheral Interface*.
- I²C: *Inter-Integrated Circuit*.
- ANSI: *American National Standards Institute*.
- ISO: *International Organization for Standardization*.
- PC: Micro-computador.



LISTA DE SÍMBOLOS

P: Potência

E: Tensão

R: Resistência

T: Temperatura

π : PI (3.14159)

Sd: Área do Cone

αT : Coeficiente de Temperatura do Fio da Bobina

R_E : Resistência Ôhmica da Bobina

Red: Resistência não linear da Bobina

K_{rm}: Constante expressa em Ohms

E_{rm}: Constante adimensional

L_{ed}: Indutância não linear da Bobina

K_{xm}: Constante expressa em Henrys

E_{xm}: Constante adimensional

X_{Le}: Reatância da Bobina



SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
SUMÁRIO	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Visão Geral do Problema.....	16
1.2. Formulação do Problema	16
1.3. Definição do Escopo do Projeto	2
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1. O Alto-Falante	3
2.1.1. História do Alto-Falante.....	3
2.1.2. Componentes do Alto-Falante.....	4
2.1.3. Impedância da Bobina.....	7
2.1.4. Tipos de Alto-Falantes	8
2.1.5. Não-Linearidades da Bobina do Alto-Falante	8
2.1.6. Transferência Mecânica de Calor no Alto-Falante	9
2.1.7. Temperatura da Bobina.....	11
2.2. Ruído Rosa	14
2.3. Potência NBR 10303.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1. Descrição Geral do Sistema	18



3.1.1. Etapa de Potência.....	19
3.1.2. Etapa de Aquisição (Analogico/Digital)	24
3.1.3. Etapa de Processamento (Software)	34
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
4.1. Teste de Aferição do Equipamento	38
4.2. Testes Comparativos.....	42
4.3. Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	45
5. REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DA PROGRAMAÇÃO.....	49
APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR EM C	50
APÊNDICE C – AMBIENTE DE TESTES.....	53
ANEXO A – CATÁLOGO ALTO-FALANTE 15SW1P	54



1. INTRODUÇÃO

1.1. *Visão Geral do Problema*

A temperatura da bobina de um alto-falante em sistemas de alta potência pode atingir valores maiores que 250°C. O aumento desta temperatura produz um efeito indesejado conhecido como “*power compression*” (compressão de potência) e temperaturas superiores a esta geralmente causarão danos ao alto-falante. Ter o conhecimento desta temperatura, sob condições de teste e operação, é necessário para reduzir falhas por excesso de temperatura.

Portanto, apenas ter a informação de potência máxima admitida pelo falante não é suficiente para se ter uma operação segura do ponto de vista térmico, pois o mesmo depende de outros fatores, como por exemplo, capacidade de dissipação de calor da bobina, temperatura ambiente, frequências e formas de onda dos sinais envolvidos, tempo de operação e tipo de amplificador utilizado. Desta forma, mesmo que sejam respeitados os limites máximos de potência especificados pelo fabricante, ainda sim pode ocorrer um dano irreversível causado pelo excesso de temperatura da bobina.

1.2. *Formulação do Problema*

O monitoramento da temperatura da bobina do alto-falante na fase de teste de potência, permite que a equipe de desenvolvimento do produto possa fazer um estudo mais detalhado sobre o comportamento térmico do mesmo.

É o aprimoramento das técnicas e os diversos tipos análise, que tornarão o produto mais eficiente e confiável por parte do cliente, uma vez que são capazes de aumentar a sua confiabilidade.



No caso de alto-falantes, o custo-benefício de um projeto como o apresentado neste trabalho é muito significativo, tanto no aspecto de investimento financeiro como no ganho da qualidade final do produto.

1.3. Definição do Escopo do Projeto

Aplicando-se uma corrente contínua e idealmente constante na bobina móvel do alto-falante, durante um teste de potência, faz com que um valor de tensão contínua seja gerado sobre a mesma, não sendo necessário levar em consideração as não-linearidades do transdutor dependentes da corrente.

O valor de tensão contínua na bobina, assim como o valor da corrente constante que está sendo inserida junto ao sinal de teste proveniente do amplificador, no alto-falante, é monitorado pelo microcontrolador e através da sua variação pode-se chegar ao valor de temperatura instantânea no fio da bobina.

Os dados de temperatura, depois de calculados, são enviados via porta serial, permitindo que futuramente um software possa gerar um gráfico em função do tempo de operação. Com o gráfico plotado, o analista passa a ter informações fundamentais para desenvolver produtos melhores e mais específicos para cada tipo de aplicação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O Alto-Falante

2.1.1. História do Alto-Falante

A história dos alto-falantes utilizados atualmente teve seu início no ano de 1874, quando Ernest W. Siemens (fundador da Siemens & Halske) desenvolveu um dispositivo similar ao alto-falante eletrodinâmico com bobina móvel. Porém seu dispositivo, que utilizava uma bobina circular posicionada em um campo magnético, era utilizado inicialmente como atuador mecânico (relé telegráfico).

Em 1877, o mesmo Siemens desenvolveu, da mesma forma que o radiador sonoro de um transdutor de bobina móvel, um diafragma não magnético, que tinha sua forma parecida com o de uma trombeta devido as extremidades exponencialmente alargadas. Desta forma, surgiu o alto-falante corneta, que fora utilizado na maioria dos fonógrafos mecânicos, inventados neste mesmo ano por Thomas Edson e que pode ser visualizado na figura 1.



Figura 1 – Fonógrafo de Edson (diafragma ligado à corneta)

Enfim, em 1898, Oliver Lodge obteve a primeira patente de um alto-falante. Com espaçadores não magnéticos para manter a abertura de ar entre os pólos internos e externos, e a “aranha” (responsável pela centragem), desenvolvida por Anton Pollak em 1908, os princípios básicos deste transdutor mantêm-se até hoje.

2.1.2. Componentes do Alto-Falante

Segundo DICKASON (1997), alto-falantes são transdutores eletrodinâmicos de graves, médios e agudos, e se baseiam todos em um mesmo conceito: um diafragma em movimento, devido a um campo magnético modulado em amplitude, atuando em conjunto com um ímã permanente. Este mecanismo é análogo ao de um motor elétrico, sendo, no caso do alto-falante, o rotor substituído pela bobina móvel.

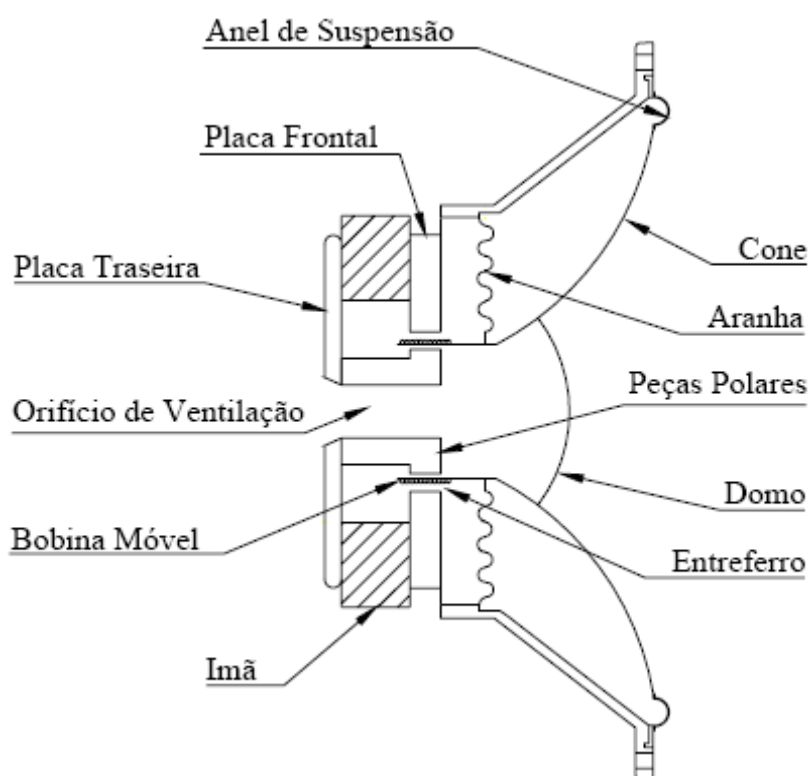


Figura 2 – Componentes do Alto-Falante em corte

A Figura 2 mostra uma vista em corte de um típico alto-falante eletrodinâmico e seus componentes principais. Quando se aplica corrente à bobina móvel, um campo eletromagnético é produzido perpendicularmente ao fluxo da corrente e ao campo do ímã permanente. A força mecânica resultante obriga o diafragma (ou cone) a deslocar-se em um movimento perpendicular ao campo magnético no entreferro, movimentando o ar em ambos os lados do cone.



Três sistemas distintos, mas interligados entre si, operam em uníssono em um transdutor eletrodinâmico:

- Sistema Motor: composto pelo ímã, peça polar, placa frontal, bobina móvel e placa traseira;
- Diafragma: normalmente um cone, com um domo protetor;
- Suspensão: consistindo de aranha e do anel de suspensão.

Sistema Motor

O sistema motor é composto basicamente por cinco partes, que são: placa frontal e peça polar que, em conjunto, formam o entreferro, ímã permanente, bobina móvel e placa traseira. As placas traseira e frontal, assim como a peça polar, são construídas de um material de alta permissividade, como o ferro, e proporcionam um caminho cômodo para o fluxo magnético do ímã. O ímã é usualmente feito de ferrite cerâmica, em forma de anel. O circuito magnético fecha-se no entreferro, produzindo um campo magnético intenso entre a peça polar e a placa frontal.

BORWICK (1988) explica que, caso uma corrente alternada senoidal seja aplicada à bobina móvel, ter-se-á um fluxo de corrente em um determinado sentido durante o semi ciclo positivo, o que deslocará o cone em uma dada direção. Quando o fluxo de corrente inverter-se durante o semi ciclo negativo, a polaridade do campo magnético inverter-se-á também, obrigando o deslocamento do cone a tomar o sentido oposto, conseqüência das sucessivas atrações e repulsões dos dois campos.

Diafragma

DICKASON afirma que o som produzido por um alto-falante nada mais é do que uma turbulência ritmada no ar, causada pelo movimento do diafragma, resultado da interação do campo magnético da bobina com o do ímã permanente. Composto pelo cone e por um domo protetor, o diafragma pode interferir na qualidade e nas características de resposta de um alto-falante.

Existem duas formas básicas de cone, utilizadas em projetos de diafragmas: a cônica e a convexa. Os cones de forma cônica tendem a apresentar um elevado pico no extremo superior da faixa de resposta, sendo sua localização determinada,



em parte, pelo ângulo de inclinação do cone. Comparando com a forma convexa, a banda passante é um pouco mais larga. Segundo BORWICK, os cones convexos tendem a produzir uma resposta de frequência mais plana, e apenas um moderado pico na resposta de altas frequências (menos eficiência nas altas frequências), com uma ligeira redução na banda passante, em comparação com os cones planos. A resposta de frequência dos cones convexos pode ser modificada e controlada através de sua curvatura.

Os domos são responsáveis por proteger a região formada entre a bobina e a peça polar, exposta a partículas estranhas. Porém os domos também podem alterar a resposta de alta frequência do alto-falante. Como existe tendência natural do cone irradiar apenas pela área do centro as frequências mais elevadas, o domo pode desempenhar papel crítico nessa faixa, conforme o material de sua construção e forma geométrica. Domos sólidos tendem a produzir maiores alterações na resposta de frequência que os porosos. Ocasionalmente encontram-se domos sólidos com um orifício de ventilação telado, o que lhes dá os benefícios (ou inconvenientes) de ambos os métodos.

Suspensão

A suspensão de um alto-falante é composta por dois elementos: o anel de suspensão e a aranha. Ambos são responsáveis por um parâmetro fundamental do alto-falante, a “compliância”, que é o mesmo que o inverso da rigidez, e também fornecem a energia necessária para que o cone e a bobina móvel voltem aos respectivos estados de repouso. A aranha contribui com 80% da compliância do alto-falante, enquanto o anel contribui com os 20% restantes.

O anel de suspensão é geralmente feito de um material elastomérico ou compósito (resina fenólica + fibra de algodão), e possui duas funções importantes. A primeira função é ajudar a manter centrada a bobina móvel do alto-falante e a segunda, de importância fundamental, é amortecer os modos de vibração na borda externa do cone. De acordo com DICKASON, a escolha da espessura do tipo de material usado nesse anel pode alterar dramaticamente as características do alto-falante. A habilidade do anel de suspensão para amortecer vibrações, impedindo que sejam refletidas de volta ao cone, modifica tanto a amplitude como a fase nos

modos de ressonância, fazendo dele um elemento importante do projeto do alto-falante e uma ferramenta eficaz para a configuração da resposta.

A aranha, normalmente feita de linho corrugado, desempenha várias funções. Sua função secundária é manter centrada a bobina móvel no GAP e impedir a entrada de partículas estranhas no entreferro. Contudo, sua principal finalidade é proporcionar a maior parte da força restauradora (compliância) do alto-falante. É a rigidez da aranha uma das variáveis determinantes no cálculo da frequência de ressonância do alto-falante.

2.1.3. Impedância da Bobina

A impedância da bobina de um alto-falante sofre influências que vão além das resistências e reatâncias dos componentes existentes de forma física. Componentes do lado mecânico, assim como do lado acústico, influenciam na corrente que circula pela bobina, através de seus “reflexos”, como acontece em um transformador, onde a corrente do primário depende da carga aplicada no secundário, seguindo a relação do número de espiras. No caso do alto-falante, essa relação é feita através da área efetiva do cone (S_d).

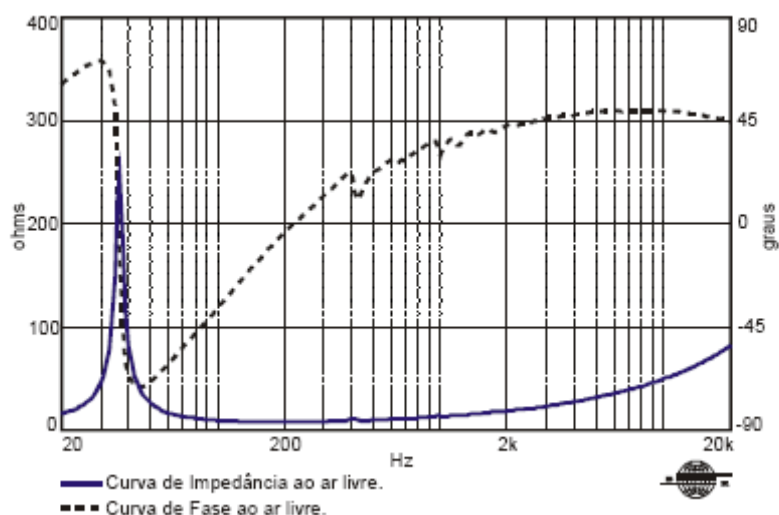


Figura 3 – Curvas de Impedância e Fase de um Alto-Falante ao ar livre



2.1.4. Tipos de Alto-Falantes

Os alto-falantes são divididos em categorias de acordo com faixa de frequência em que atuam:

Sub-Woofers – são projetados para reproduzir frequências extremamente baixas, de 20 a 120Hz. Possuem suspensão de alta compliância, alta excursão, frequência de ressonância baixa, bobina com enrolamento alto e alta potência.

Woofers – são projetados para reproduzirem frequências graves, de 100 a 500Hz, a grande maioria responde até a 3.000Hz. Utilizam vários tipos de borda: espuma, tecido, borracha e papel, possuindo excursão média/baixa, enrolamento de bobina menor que o *Sub-Woofers*.

Mid-Ranges – são projetados para responderem em frequências médias, de 250 a 5000Hz.

Drivers – projetados para responder em frequências média/altas, de 1000 a 7000Hz. Os *Drivers* de titânio, mais atuais, respondem até na faixa de frequência dos *Tweeters*, chegando a alcançarem respostas em 20000Hz.

Tweeters – projetados para responderem em frequências altas, de 5000Hz a 20000Hz.

2.1.5. Não-Linearidades da Bobina do Alto-Falante

A resistência da bobina, R_e , pode ser decomposta em duas componentes: R_E , que é a resistência ôhmica ou DC e outra, em série com a primeira, denominada R_{ed} , que aumenta com a frequência, e representam as perdas devido às correntes de Eddy, induzidas na ferragem do conjunto magnético. Esta componente não-linear é dada pela equação:

$$R_{ed} = K_{rm}(\omega^{E_{rm}})$$

Onde:

K_{rm} é uma constante expressa em Ohms e E_{rm} é uma constante adimensional, no expoente.

A indutância da bobina, pela mesma razão, tem também um comportamento não linear, sendo seu valor dado pôr:

$$L_{ed} = K_{xm} \cdot \omega^{(E_{xm}-1)}$$

Onde:

K_{xm} é uma constante expressa em Henrys e E_{xm} é uma constante adimensional, no expoente.

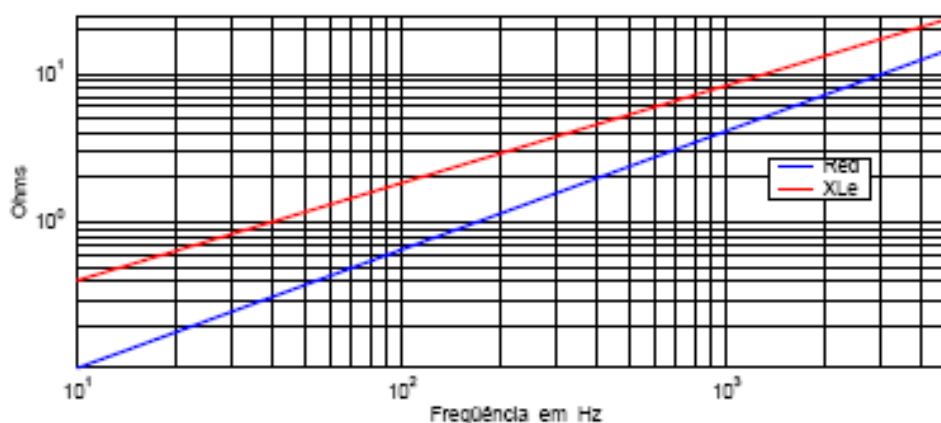


Figura 4 – Componentes Não-Lineares Red e XLe

2.1.6. Transferência Mecânica de Calor no Alto-Falante

Segundo HENRICKSEN (1977), a temperatura da bobina móvel é a principal causa de defeitos e falhas nos alto-falantes. A temperatura eleva-se de acordo com o sinal elétrico aplicado e também pelo coeficiente de transferência de calor total da bobina. O valor total deste coeficiente é o resultado direto da variação dos mecanismos de transferência de calor, incluindo condução, radiação, convecção natural, convecção forçada e armazenamento de calor.

Uma limitação da capacidade de manuseio de energia de uma bobina móvel do alto-falante é a temperatura da bobina móvel, cujo resultado é o fornecimento de energia para o alto-falante. Temperaturas excessivas estragam adesivos, revestimentos e a estrutura dos materiais, levando a falhas catastróficas do produto. Por esta razão, um alto-falante que consegue dissipar melhor o calor, pode

(ao menos, termicamente) suportar mais energia que os demais. Esta habilidade de dissipar calor é caracterizada pela resistência térmica do dispositivo, expressos em $^{\circ}\text{C}/\text{watt}$ e outras unidades similares. Isto mostra o quanto de aquecimento térmico ocorrerá no dispositivo quando uma quantidade de calor passar por ele.

Existem quatro principais mecanismos de transferência de calor durante a operação normal do alto-falante, são elas:

Condução – Este tipo de transferência de calor depende do caminho físico da fonte quente para a parte fria. A condução de calor depende da geometria física, diferencial de temperatura e da propriedade de condução de calor do material. A maior parte da transferência de calor por condução dá-se através do ar entre a bobina e o conjunto magnético.

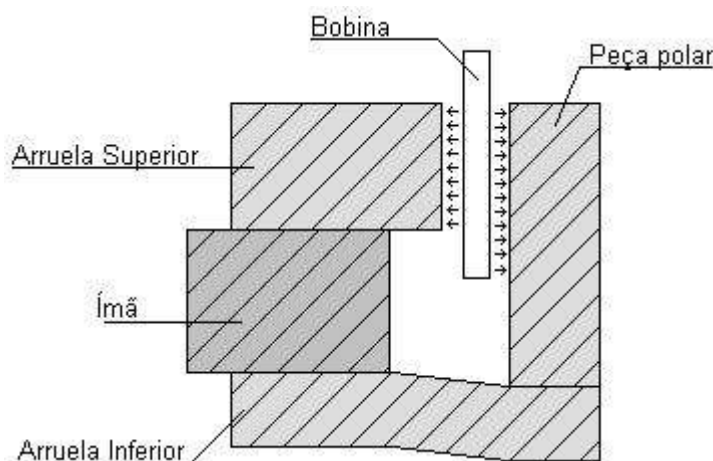


Figura 5 – Condução do ar entre a bobina e o conjunto magnético

Radiação – Na natureza, transferência de calor por radiação depende da quarta potência da temperatura absoluta, emissividade e área da superfície. Esta transferência pode ocorrer entre a bobina móvel e o ar, entretanto é mais significativa quando ocorrida entre a bobina e o conjunto magnético.

Convecção Forçada – Transferência de calor por convecção forçada é o resultado do movimento do conjunto móvel que gera um fluxo de ar que passa entre a bobina e o conjunto magnético. Este tipo de transferência de calor é proporcional a quantidade de movimento.

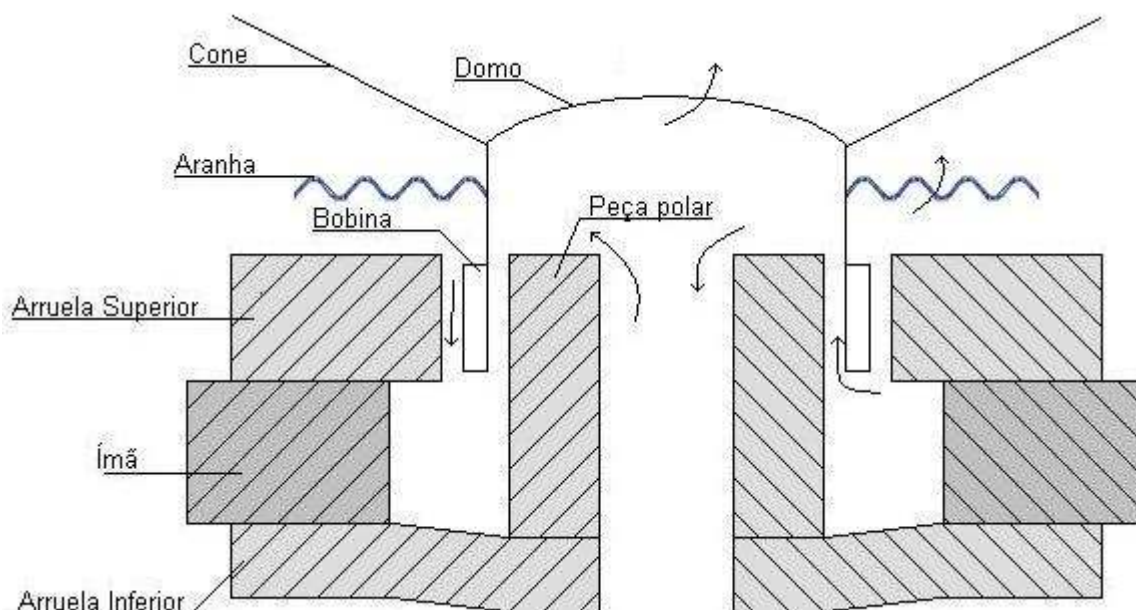


Figura 6 – Convecção forçada no alto-falante

Armazenamento de Calor – A quantidade de calor armazenada em um material depende do seu calor específico, tamanho e densidade. O armazenamento de calor no material acontece sem a transferência de calor para fora e a sua temperatura, por sua vez, aumenta de acordo com o aumento de calor aplicado. Este efeito é análogo a um capacitor elétrico. O calor é introduzido no material e a temperatura aumenta até se estabilizar, passando a fornecer calor para o seu exterior. A introdução deste efeito transiente e a constante de tempo são similares a constante elétrica RC.

2.1.7. Temperatura da Bobina

Neste tópico será mostrado um trabalho apresentado por SETTE (2000), onde se aborda o conhecido fenômeno da variação da resistência da bobina móvel dos alto-falantes eletro dinâmicos, com a temperatura, apresentando resultados práticos obtidos em medições feitas em laboratório, bem como uma análise das equações normalmente usadas no equacionamento deste problema.

Relacionar a resistência da bobina com sua temperatura é a forma mais prática de avaliar se um falante está operando dentro de limites confiáveis, do ponto de vista térmico, uma vez que a temperatura atingida pela bobina durante a operação é um dado fundamental para a sobrevivência do alto-falante.



Descrição da Experiência

Para a coleta dos dados foram utilizadas três bobinas, de diferentes produtos. Estas bobinas, separadas dos respectivos transdutores, foram colocadas em uma estufa, dotada de um controle digital de temperatura, sendo esta variada no intervalo de 26 a 169°C. Para cada nova temperatura, após sua estabilização, eram lidos os respectivos valores de resistência ôhmica num total de 14 medidas. Todas as medidas efetuadas foram aproveitadas e nenhuma apresentou erro acentuado.

CARACTERÍSTICAS DA BOBINA			
Alto-Falante	WPU1805	18SW1P	D4400
Diâmetro da Bobina	100mm	100mm	100mm
Material da Forma	Kapton (0,125mm)	Fibra de Vidro	Kapton (0,075mm)
Tipo de Fio	Cobre Redondo	Alumínio cobreado chato	Alumínio cobreado chato
Bitola do Fio	28 AWG	24 AWG	32 AWG

Tabela 1 – Características das Bobinas Utilizadas

VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA BOBINA COM A TEMPERATURA			
Temperatura (°C)	WPU 1805 (Ω)	18SW1P (Ω)	D4400 (Ω)
26,0	6,83	6,17	5,28
39,4	7,18	6,49	5,57
45,6	7,34	6,63	5,71
54,2	7,58	6,86	5,88
66,2	7,93	7,20	6,18
90,0	8,49	7,73	6,67

93,6	8,57	7,77	6,75
106,2	8,92	8,13	7,01
114,1	9,18	8,38	7,20
122,8	9,42	8,60	7,41
133,3	9,67	8,85	7,63
140,3	9,90	9,08	7,79
150,0	10,14	9,30	7,98
168,9	10,62	9,76	8,37

Tabela 2 – Valores medidos no experimento

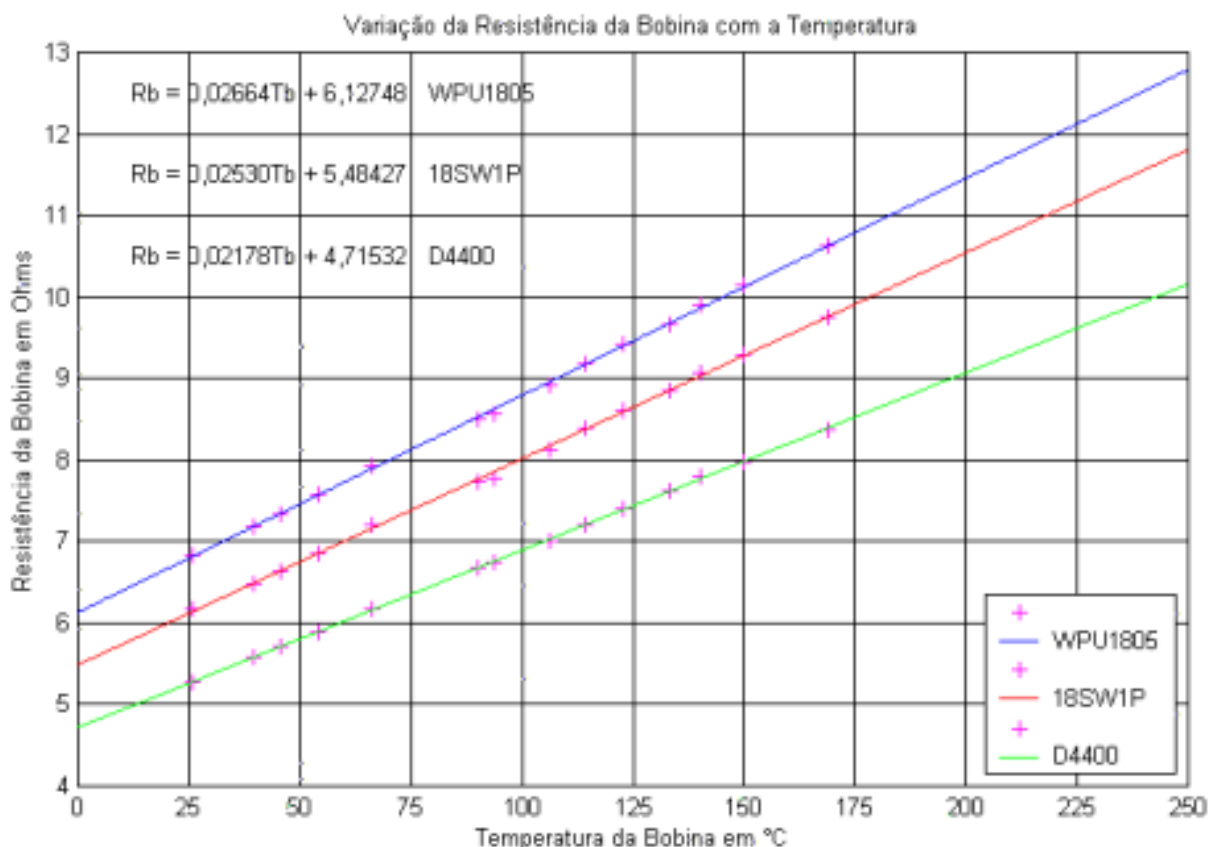


Figura 7 – Gráfico demonstrativo dos valores medidos

Consultando a literatura especializada para cálculo da temperatura, percebe-se que o mais comum é a utilização de uma equação onde aparece o parâmetro α , denominado coeficiente de temperatura do material, normalmente

referido a uma temperatura de 25°C, ou seja, α_{25} . Esse coeficiente a 25°C assume, respectivamente, os valores de 0,00385 e 0,00401 para o cobre e o alumínio genéricos. A equação abaixo possibilita a obtenção de α , em função dos valores obtidos nas medições, não apenas para 25°C, mas para qualquer outra temperatura desejada.

$$\alpha_A = \frac{R_B - R_A}{R_A * (T_B - T_A)}$$

Onde: R_B é a resistência da bobina em determinada temperatura T_B ; R_A é a resistência na temperatura ambiente T_A ; α_A é o coeficiente de temperatura do material.

2.2. Ruído Rosa

Segundo DUTTA (1981) Ruído Rosa ou Ruído de $1/f$ é um sinal ou um processo onde o espectro de frequências como a densidade espectral de potência é inversamente proporcional à frequência do sinal. O termo originou-se pelas características desse ruído serem intermediárias entre o ruído branco ($1/f^0$) e o ruído vermelho ($1/f^2$), mais conhecido como ruído Browniano.

Na literatura científica o termo ruído de $1/f$ (*1/f noise* em inglês) é algumas vezes referenciado para descrever um conjunto de sinais cujo espectro de potência do sinal é dado pela fórmula:

$$S(f) \propto 1/f^a$$

onde f é a frequência com $0 < a < 2$, onde a usualmente aproxima-se de 1. O ruído do tipo " $1/f$ " ocorre amplamente na natureza e é considerado de interesse em várias aplicações. Por sua característica de representar um ruído natural é frequentemente utilizado na acústica como simulador de programação sonora.

O ruído rosa caracteriza-se por manter a potência (energia) igual entre todas as oitavas sonoras (e também em qualquer outra escala logarítmica). Em termos de uma banda de frequência constante, o ruído rosa decai numa razão de 3 dB por oitava, conforme mostrado na figura 8. Em altas frequências o ruído rosa nunca se torna dominante tal qual o ruído branco que possui energia constante em função da frequência (o ruído branco é rico na programação de altas frequências).

O sistema auditivo humano percebe as frequências conforme a escala de Bark e tem alta sensibilidade nas frequências de 2-4-kHz. A percepção da diferença entre o ruído rosa e o ruído branco é facilmente perceptível aos ouvidos humanos mesmo considerando que as maiores diferenças encontram-se nos extremos do espectro de frequências.

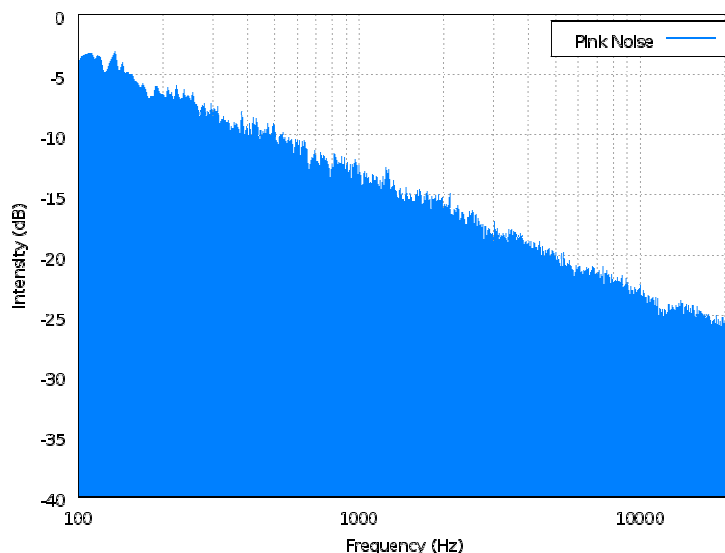


Figura 8 – Espectro do Ruído Rosa em escala Logarítmica

Equalizadores gráficos também dividem os sinais em bandas logarítmicas de frequências e sinalizam a potência em oitavas; engenheiros de áudio utilizam o ruído rosa para calibrar os sistemas de áudio ponderado a acústica do ambiente afim de obter uma resposta plana do conjunto sonoro.

Do ponto de vista teórico, a produção de um verdadeiro sinal de ruído rosa é impossível pois a energia desse sinal seria infinita, assim como para o ruído branco. Esses sinais são aproximados dentro da banda de frequências desejadas.

2.3. Potência NBR 10303

A norma brasileira NBR 10303 especifica que a medição da potência suportada por um alto-falante deve ser feita durante duas horas, aplicando-se um sinal de ruído rosa, filtrado, conforme o diagrama de blocos mostrado na figura 12,

sendo que a função de transferência do filtro, recomendado pela norma, pode ser vista na figura 9.

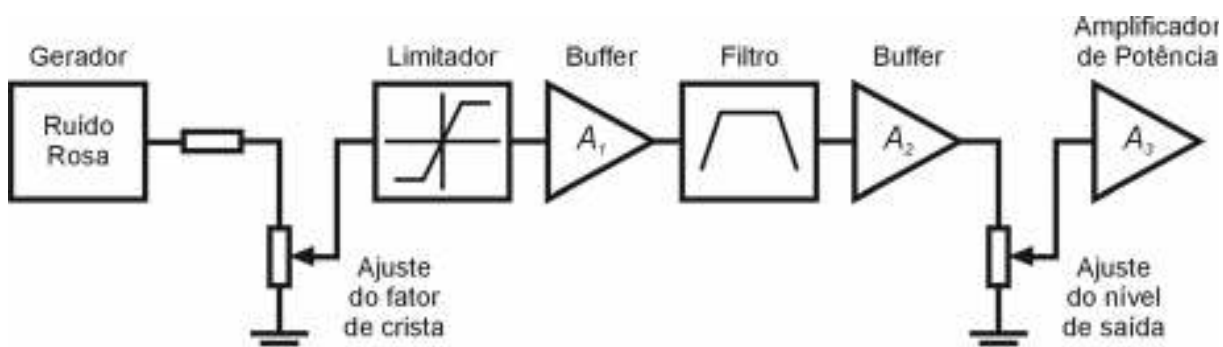


Figura 9 – Diagrama de blocos do setup de medição, para aplicação da norma NBR 10303

De acordo com SETTE (2005), este teste tem por objetivo determinar a capacidade do alto-falante suportar potência elétrica, sendo o comportamento térmico do transdutor um dos fatores determinantes principais do resultado.

As tensões são medidas com voltímetro do tipo valor eficaz verdadeiro (*true RMS*), e as potências calculadas através da relação $P=E^2/R$, onde R costuma ser igual à impedância nominal do alto falante.

No caso de *drivers* e *tweeters* são utilizados circuitos de filtro, que têm a finalidade de impedir a passagem dos sinais de baixa frequência para a bobina do transdutor. Deste modo, a tensão usada para o cálculo da potencia é medida na saída do amplificador, ou seja, na entrada do filtro, e não sobre a bobina do *driver*, ou *tweeter*, em teste. Os valores assim medidos serão muito mais altos que os encontrados sobre a bobina do transdutor, uma vez que mesmo as componentes barradas pelo capacitor (e que não vão fornecer energia ao transdutor) serão computadas no cálculo da potência.

No caso de crossovers ativos, toda a tensão medida estará sendo aplicada diretamente na bobina e, conseqüentemente, produzirá potência no transdutor.

Por este motivo, a potência especificada para o caso de crossovers ativos está em torno de 40 % do valor especificado para crossovers passivos, segundo determina a experiência prática.

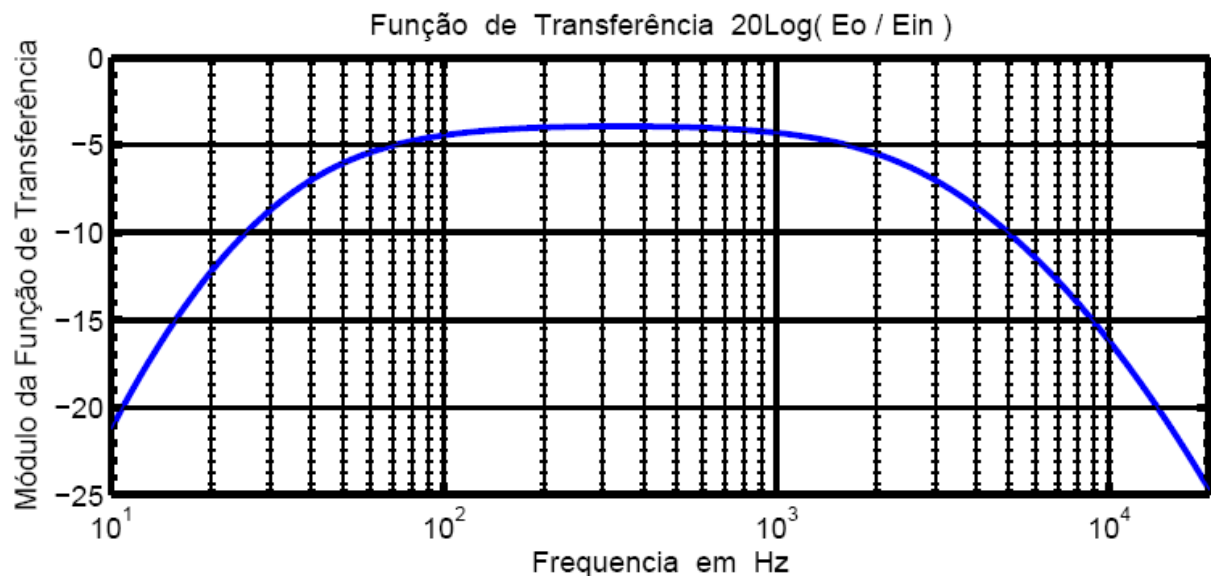


Figura 10 – Função de transferência do filtro usado na norma NBR 10303

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição Geral do Sistema

O sistema desenvolvido para monitorar a temperatura da bobina móvel do alto-falante, durante os processos de testes de potência, utiliza a idéia de obter a resistência instantânea da bobina em um determinado instante e verificar a temperatura através de sua variação ôhmica.

A figura 11 fornece uma idéia da estrutura do projeto, com os principais componentes e as suas respectivas comunicações.

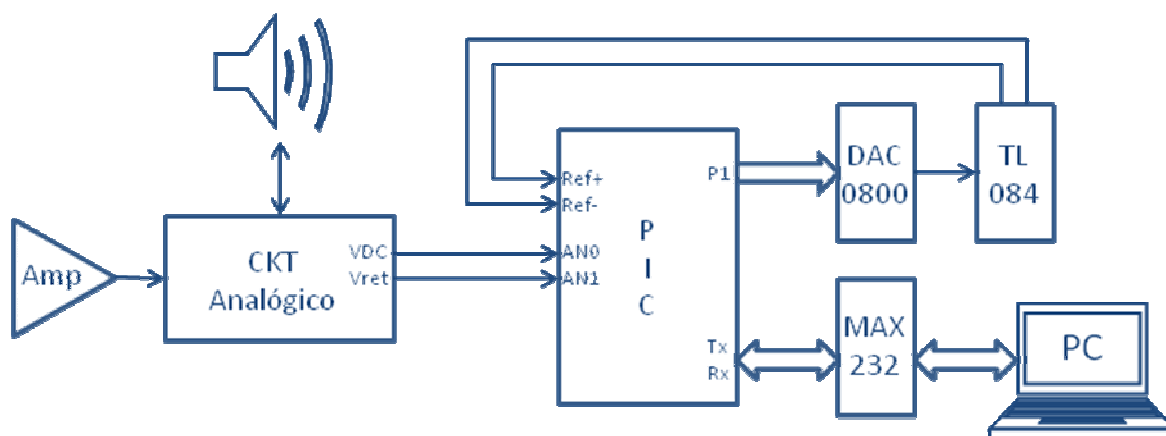


Figura 11 – Diagrama de blocos estrutural do projeto

O projeto é subdividido em três partes principais: potência (analógica), aquisição (analógica/digital) e processamento (digital). Na seqüência estas partes serão detalhadas individualmente, sendo possível uma melhor compreensão do trabalho.

3.1.1. Etapa de Potência

Esta etapa analógica do projeto é onde o sinal aplicado ao alto-falante é modificado, sendo inserido a ele um valor de corrente contínua, insignificante do ponto de vista térmico, porém fundamental para se obter futuramente o valor da temperatura instantânea da bobina durante o teste. Também nesta etapa, os valores de tensão retificada e tensão DC na bobina do alto-falante são obtidos e enviados para a etapa seguinte do projeto, a etapa de aquisição e tratamento dos valores lidos.

A seguir tem-se o esquema elétrico do circuito analógico de potência para visualizar melhor o que foi dito anteriormente.

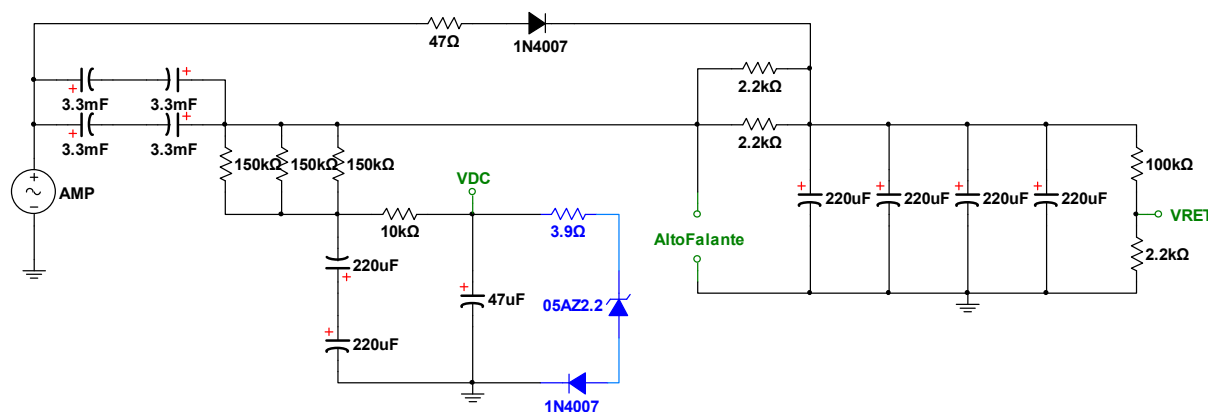


Figura 12 – Circuito analógico de potência

O sinal que chega ao alto-falante é composto por duas componentes, uma alternada e outra contínua. A parte alternada provém do amplificador, que não sofre alterações devido a existência dos capacitores na entrada do circuito. Estes capacitores funcionam como um passa-alta, porém com frequência de corte muito baixa, e o objetivo deles é não deixar sinal contínuo ir do circuito de medição para o amplificador e vice-versa.

Considerando um alto-falante de impedância igual a 4Ω , e um banco de capacitores de capacitância, bipolar, equivalente de $3300\mu\text{F}$, a frequência de corte desta parte do circuito fica definida como:

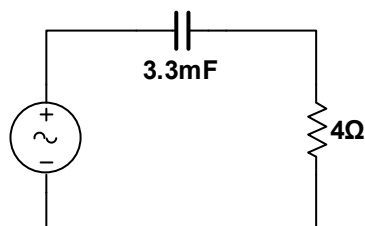


Figura 13 – Filtro passa-alta

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{6.28 * 4 * 0.0033} \cong 12.06Hz$$

Este mesmo sinal proveniente do amplificador, e que é aplicado no alto-falante, é filtrado e retificado pelos capacitores de 220uF, à direita do circuito. Esta tensão constante irá gerar uma corrente contínua definida pela divisão do valor do sinal retificado pelos dois resistores de 2,2kΩ, em paralelo. A variação da resistência da bobina não interfere significativamente na variação da corrente gerada. O circuito simplificado dessa etapa analógica pode ser exemplificado na figura 14.

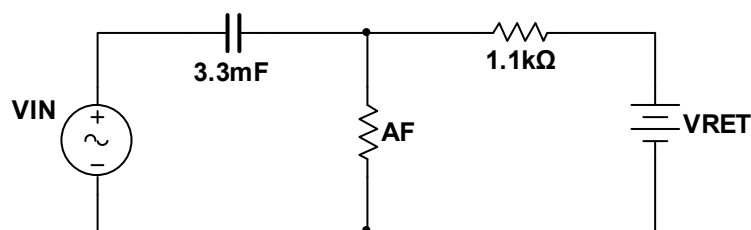


Figura 14 – Circuito analógico simplificado

A corrente contínua que se originou na parte retificada, ao passar pela bobina do alto-falante, irá gerar uma tensão em cima da mesma, de componente DC e que será medida através de um filtro de 2ª ordem, onde o valor é refletido no capacitor de 47uF. Este valor é enviado, juntamente com o valor de tensão retificada, ao microprocessador, que se encontra na parte digital do projeto.

A direita do capacitor de 47uF, detalhado em azul, tem-se uma etapa de proteção do circuito. Em caso de ruptura da bobina do alto-falante durante um teste de potência, toda a tensão anteriormente aplicada ao transdutor irá se deslocar para o filtro e, conseqüentemente, um nível de tensão maior que 5V será enviado ao microcontrolador, ocasionando a queima do mesmo. O circuito de proteção drena a corrente quando o valor de VDC ultrapassa a tensão de condução

do diodo zenner em série com um diodo comum, garantindo que apenas níveis de tensão seguros sejam enviados às entradas analógicas do microcontrolador PIC.

Para confecção da placa que contém os componentes utilizados neste circuito foram feitos testes e simulações no software NI Multisim 10 (Versão Estudante), como mostra a figura 15.

As figuras 18 e 19 demonstram o processo de confecção do protótipo desta etapa do circuito, desde a parte de simulação no software NI Ultiboard 10 (Versão Estudante), até a montagem física da mesma, que foi montada em uma placa fenólica para evitar quaisquer interferências que viessem a prejudicar o desempenho final do projeto.

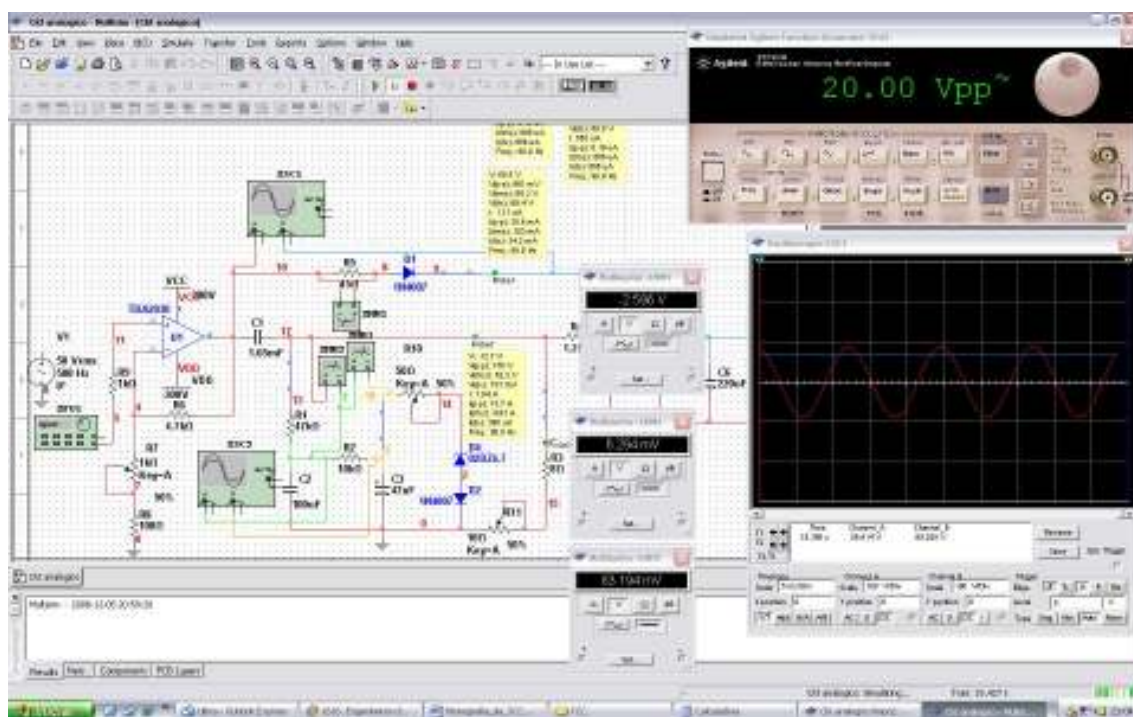


Figura 15 – Simulações com software Multisim 10

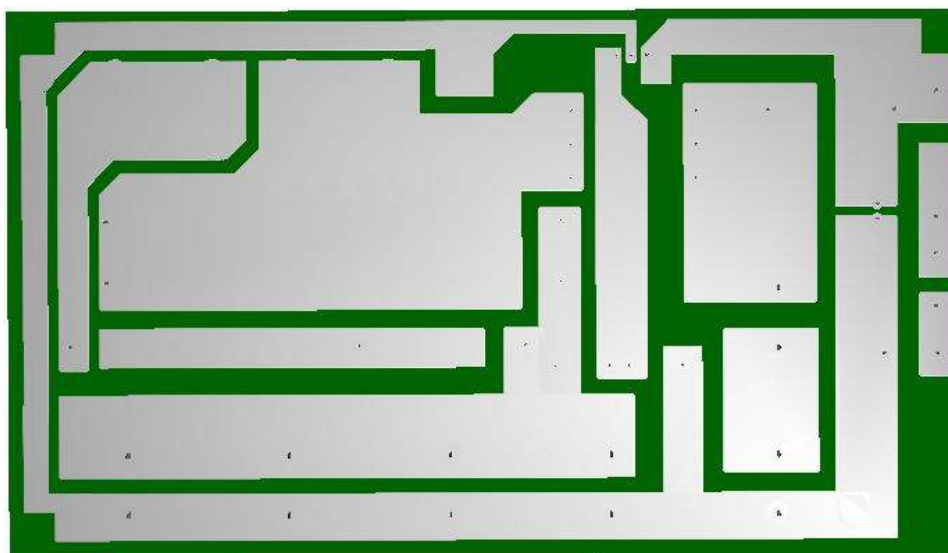


Figura 16 – Layout da placa feito no software Ultiboard 10

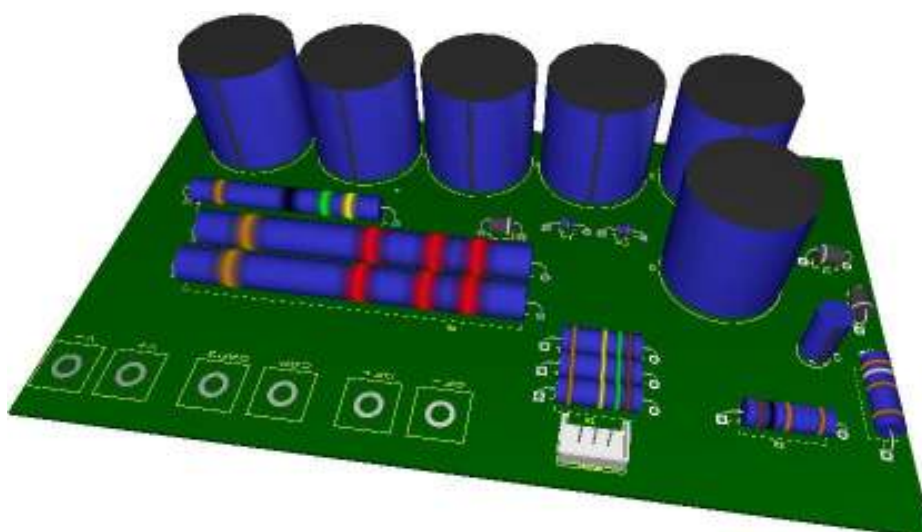


Figura 17 – Vista 3D da placa projetada



Figura 18 – Etapa de corrosão da placa fenólica



Figura 19 – Placa finalizada em funcionamento



3.1.2. Etapa de Aquisição (Analógico/Digital)

É na etapa de aquisição de dados que os sinais obtidos na etapa analógica são digitalizados e convertidos em valores de interesse por parte do analista.

Para entender melhor este ponto, será detalhado cada componente do circuito e, ao final, feito uma análise geral do sistema com todas as suas partes atuando.

Microcontrolador PIC 16F877A

O PIC é da família de microcontroladores fabricados pela Microchip Technology, que processam dados de 8 bits com extensa variedade de modelos e periféricos internos.

O microcontrolador escolhido para o projeto, PIC16F877A, é o principal componente do circuito, pois todas as informações existentes, assim como os outros componentes, estão diretamente ligadas a ele. Todo o gerenciamento desta etapa do projeto é função do microcontrolador que possui um grande número de recursos disponíveis tais como:

- Microcontrolador RISC de 40 pinos, o que possibilita a montagem de um hardware complexo e capaz de interagir com diversos recursos e funções ao mesmo tempo;
- Reduzido conjunto de Instruções (35 instruções de 14 bits);
- 14 interrupções disponíveis;
- Endereçamentos do modo Direto, Indireto e Relativo;
- Pilha (stack) com oito níveis;
- 33 terminais de Entrada e Saída, com controle individual por terminal. Capacidade de manipulação de corrente de 25mA atuando como dreno e 20mA atuando como fonte;
- Memória de programação E2PROM FLASH, que permite a multi gravação rápida do programa no mesmo chip, sem a necessidade



- de apagá-lo por meio de luz ultravioleta, comum nos microcontroladores de janela;
- Memória de programa com 8Kwords, com capacidade de escrita pelo próprio código interno;
 - Memória E2PRON (não-volátil) interna com 256 bytes;
 - Memória RAM com 386 bytes;
 - 2 temporizadores de oito bits programável, com pré-divisor também programável de oito bits;
 - 1 temporizador de 16 bits;
 - Frequência de operação até 20MHz;
 - Comunicação serial: SPI, I²C e USART;
 - 8 conversores analógicos de 10 bits e 2 comparadores analógicos;
 - 2 módulos CCP: Capture, Compare e PWM;
 - Sistema de proteção de código na EEPROM (Impossibilita que outras pessoas leiam o seu código);
 - Operação em tensões desde 2 a 6 Volts, com consumo de corrente típico em torno de 2mA;
 - Power-on Reset (interno).

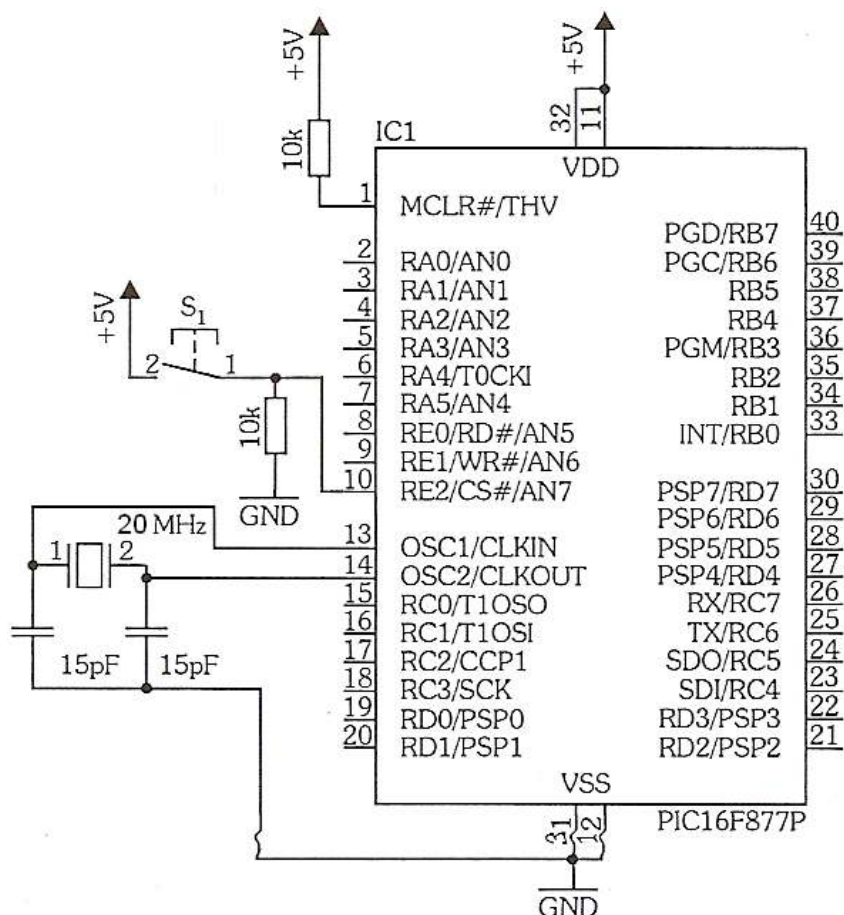


Figura 20 – Configuração Microcontrolador PIC16F877A

MAX 232

O componente MAX232 inclui um circuito de “*charge pump*” capaz de gerar tensões de +10 volts e -10 volts a partir de uma fonte de alimentação simples de +5 volts, bastando para isso alguns capacitores externos. Sua configuração pode ser observada na figura x.

A utilização deste CI deve-se ao fato de os níveis de tensão de operação da porta serial do computador e do microprocessador PIC serem diferentes. Assim, o MAX232 faz a compatibilização desses níveis de tensão.

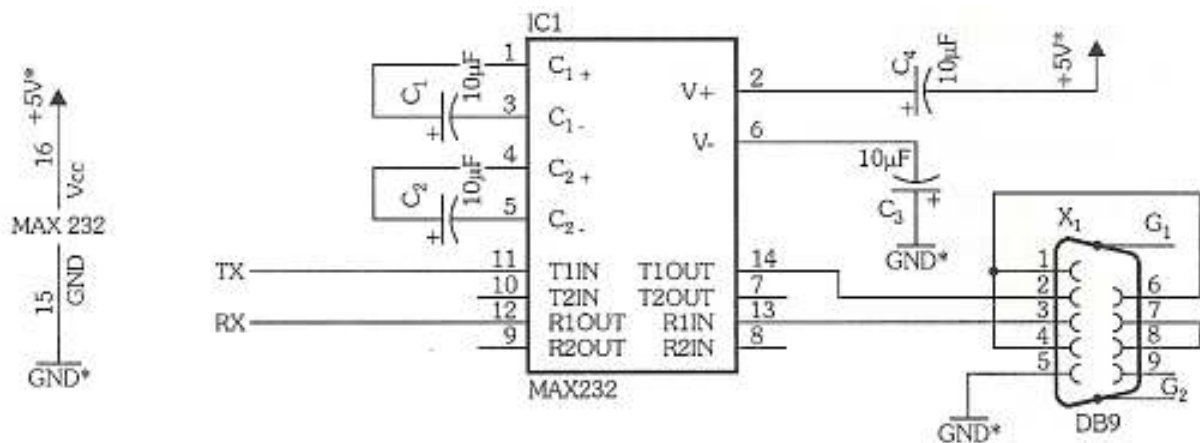


Figura 21 – Configuração MAX232

Conversor Digital-Analógico DAC 0800

Um conversor digital-analógico é um dispositivo onde um sinal digital é conectado a sua entrada e este o converte para uma tensão ou corrente analógica proporcional.

Este componente é responsável por alimentar as referências, mínima e máxima, dos conversores Analógico-Digitais do Microcontrolador PIC. O programa define os valores analógicos de referência necessários e, através da Porta B (8bits), envia ao DAC0800 para que o mesmo possa fazer a conversão solicitada. O valor convertido é igual à referência mínima e, para se obter a referência máxima, o sinal é amplificado a um fator igual a 2.2X (2.2 vezes o sinal de entrada) através de um circuito amplificador, utilizando o TL084, com a configuração não-inversora desejada. Após este processo, ambos os valores são enviados aos pinos 4 e 5 (Ref- e Ref+) do microcontrolador.

Uma característica bastante importante em um conversor D/A é a resolução. A resolução de um conversor D/A é definida como a menor alteração que pode ocorrer na saída analógica como resultado de uma mudança na entrada digital. A resolução é sempre igual ao peso do LSB e também é chamada de tamanho do degrau, pois a tensão de saída muda conforme o valor digital de entrada é alterado de um degrau para o próximo.

Este processo de referenciar a conversão analógica do microcontrolador permite que os 10 bits de resolução de um canal A/D possam se concentrar neste intervalo de valores pré-determinados, aumentando a precisão do valor lido.



O exemplo a seguir exemplifica melhor o que foi explicado anteriormente:

Caso seja enviado o valor de 100mV ao A/D cuja referência está configurada no intervalo de 0 – 5V, o valor lido será:

$$\text{Resolução} = \frac{V2 - V1}{(2^n - 1)} = \frac{5 - 0}{(2^{10} - 1)} \cong 4.888mV$$

Onde:

n é o número de bits do canal conversor;

V2 e V1 são as referências máxima e mínima, respectivamente.

O valor lido pelo canal conversor será:

$$\text{Valor} = \frac{100mV}{4.888mV} = 20.46$$

Como o valor lido deve ser inteiro, por arredondamento este valor processado será igual a 20. Sabendo a resolução do A/D, o programa processará o valor lido como:

$$\text{Valor2} = 4.888mV * 20 = 97.75mV$$

O valor lido apresentou um erro de 2.25% em relação ao valor enviado.

Agora a referência será definida no intervalo de 0.10 – 0.22V:

$$\text{Resolução} = \frac{0.22 - 0.10}{(2^{10} - 1)} \cong 117.3\mu V$$

O valor lido pelo canal conversor será:

$$Valor = \frac{100mV - 10mV}{117.3\mu V} = 767.25$$

Por arredondamento o valor lido será igual a 767. Processando este valor obtém-se:

$$Valor2 = (117.3\mu V * 767) + 10mV = 99.97mV$$

O valor, nesta situação mostrou um erro de 0.03%.

Houve uma redução bastante significativa no erro percentual dos dois exemplos citados, o que justifica a adoção deste método de medição, visto que os valores lidos neste projeto pelo canal serial terão, em diversos casos, dimensões menores de 1V.

Um erro percentual como visto no primeiro exemplo, pode significar um erro ainda maior na leitura da temperatura instantânea da bobina do alto-falante, o que tornaria o equipamento não confiável.

A figura a seguir mostra a configuração adotada para a utilização do conversor em questão.

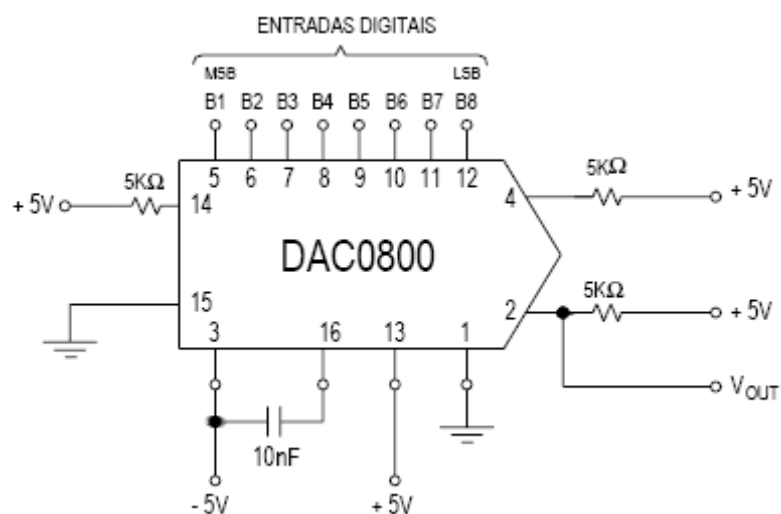


Figura 22 – Configuração Conversor D/A

TL084

O componente TL084 é um circuito integrado que possui quatro amplificadores operacionais de alta velocidade e baixo coeficiente de temperatura. A figura a seguir demonstra a configuração do mesmo.

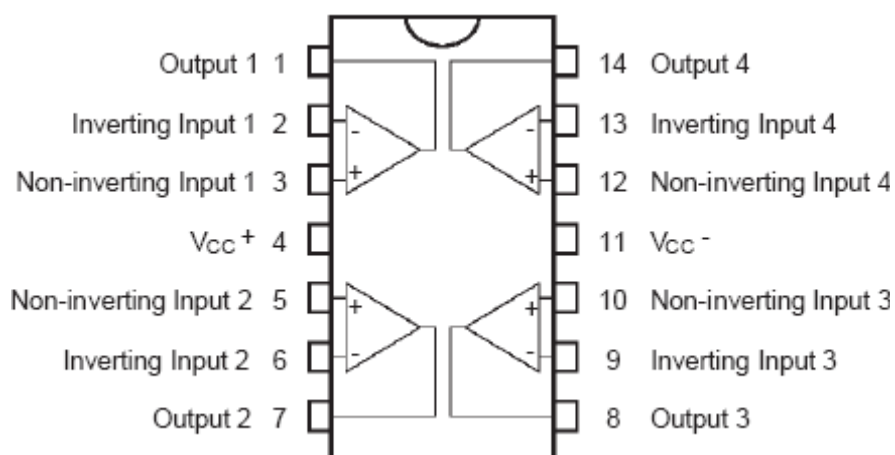


Figura 23 – Configuração do TL084

No projeto este componente assume duas funções: casar a impedância entre o sinal do D/A e do microcontrolador e alimentar as referências dos canais analógicos do PIC.

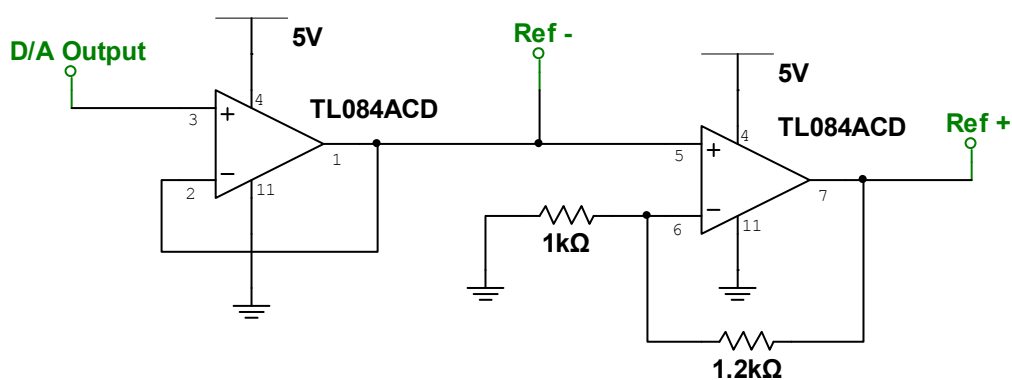


Figura 24 – Esquema elétrico TL084

A figura anterior demonstra a ligação elétrica para alimentação das referências do microcontrolador. O sinal de saída do conversor D/A alimenta o buffer, definindo a referência mínima do conversor. Por sua vez, a referência máxima é calculada da seguinte forma:

$$REF^+ = REF^- * \left(1 + \frac{1.2k\Omega}{1k\Omega}\right) = REF^- * 2.2$$

Alimentação do Circuito

Neste projeto, a etapa de aquisição de dados analógicos do circuito foi alimentada por uma fonte simétrica de $\pm 15V$, regulada em $+10V/-5V$. Com o uso do regulador de tensão LM7805 foi possível garantir níveis de tensão seguros para todos os componentes utilizados.

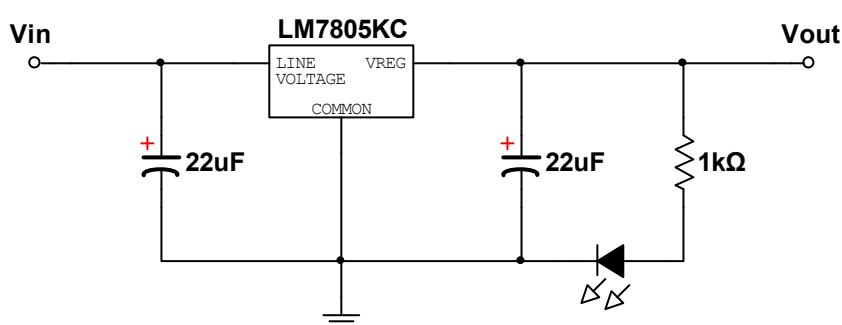


Figura 25 – Circuito regulador utilizando o LM7805



Figura 26 – Fonte simétrica $\pm 15V$



Esquema elétrico

A figura 27 demonstra o esquema elétrico final desta etapa do projeto, com todos os componentes detalhados anteriormente interligados, e a figura 28 apresenta a montagem do circuito que foi feito em placa padrão composta de ilhas e trilhas.

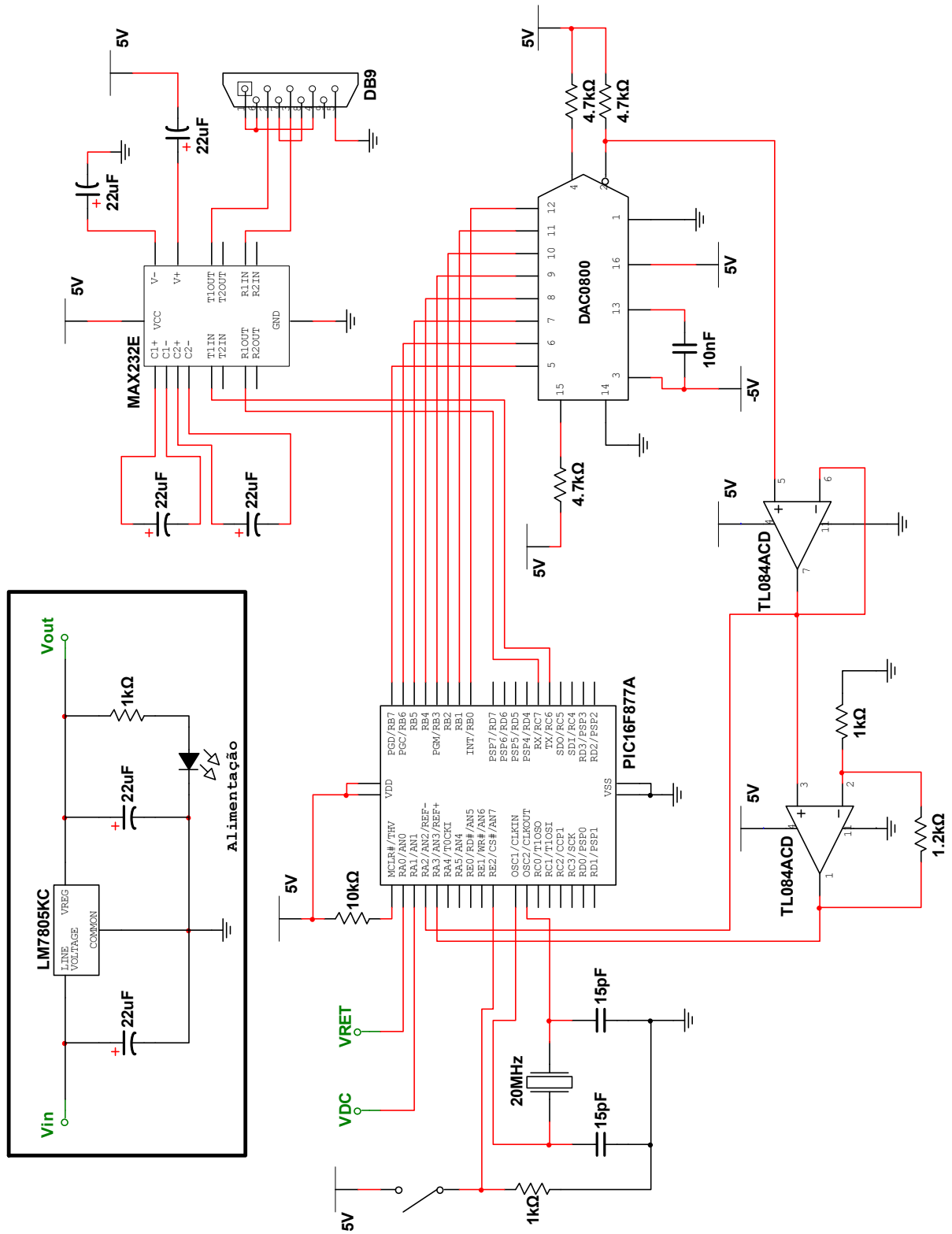


Figura 27 – Esquema elétrico etapa de aquisição

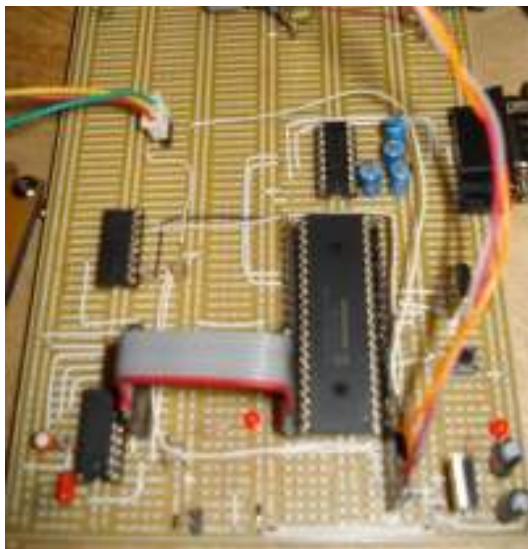


Figura 28 – Montagem em placa padrão

3.1.3. Etapa de Processamento (Software)

No presente projeto, foi utilizado um tipo de programação e processamento dos valores obtidos pelas etapas anteriormente vistas. Nesta parte está envolvida a programação do microcontrolador PIC, que é responsável pela parte de leitura dos valores lidos na etapa analógica do circuito.

O programa desenvolvido e gravado no microcontrolador é o responsável pelo gerenciamento dos principais componentes existentes no circuito. É nele que o nível de tensão retificada aplicado ao alto-falante, assim como a componente DC do mesmo, são convertidos em dados necessários para se chegar ao valor principal do projeto que é a temperatura instantânea do fio da bobina. Também no programa são definidos os valores a serem convertidos pelo DAC0800, responsável por alimentar as referências do conversor A/D do próprio PIC, além de fazer a comunicação com o MAX232, componente que possibilita o microcontrolador enviar e receber dados ao microcomputador.

Compilador CCS

No projeto foi utilizado, como plataforma de desenvolvimento do microcontrolador, o compilador PCWH da CCS. Ele consiste em um ambiente

Após compilado o programa, é necessário carregar o arquivo gerado, de extensão *.hex, para o microcontrolador. Um programa de gerenciamento de memória do PIC é gravado previamente, permitindo assim, que o arquivo possa ser enviado diretamente para o kit através de um programa “boot loader”, neste caso fabricado pela empresa de projeto eletrônicos “*Idéia1*”.



Figura 30 – Software Idéia1

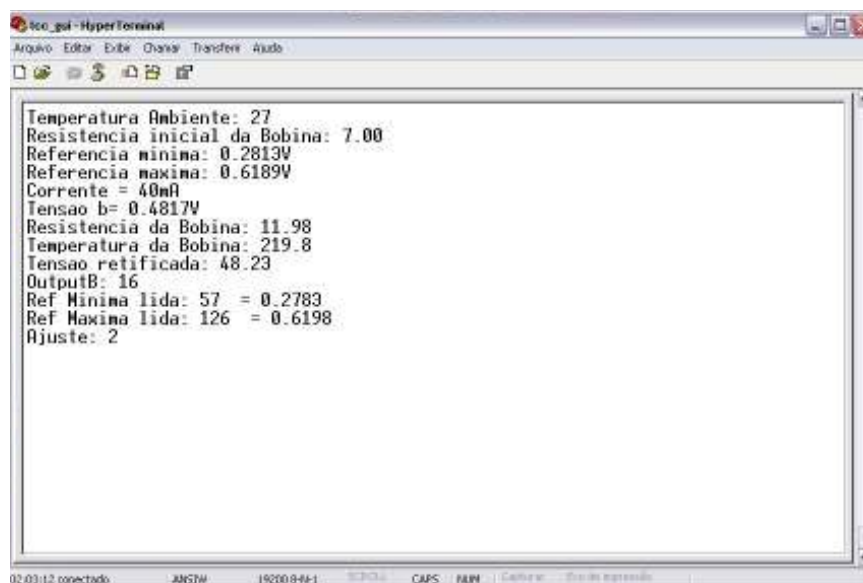
HyperTerminal

A função do microcomputador neste projeto é de se comunicar com o microcontrolador PIC e monitorar a temperatura da bobina do alto-falante. Com este objetivo foi utilizado um software capaz de monitorar e apresentar estas medidas de forma prática e compreensiva. Para isso foi escolhido o *HyperTerminal*, como destaca a figura 31.

O HyperTerminal é um programa opcional do sistema operacional *Windows 95/98/Vista*, da *Microsoft Corporation*, que você pode utilizar para conectar-se a outros computadores ou periféricos, dentre ele o microcontrolador, por intermédio do componente MAX232 visto anteriormente.

Os valores recebidos pelo microcontrolador, após processados e enviados ao microcomputador, em formato ASCII, através de uma porta de comunicação, são

decodificados pelo *HyperTerminal* e apresentados ao projetista de forma compreensível, permitindo a análise técnica dos resultados.



```
aco_gui - HyperTerminal
Arquivo  Editar  Exibir  Opções  Transferir  Ajuda

Temperatura Ambiente: 27
Resistencia inicial da Bobina: 7.00
Referencia minima: 0.2813V
Referencia maxima: 0.6189V
Corrente = 40mA
Tensao b= 0.4817V
Resistencia da Bobina: 11.98
Temperatura da Bobina: 219.8
Tensao retificada: 48.23
OutputB: 16
Ref Minima lida: 57 = 0.2783
Ref Maxima lida: 126 = 0.6198
Ajuste: 2

02/03/12 conectado  ANSM  19200844-1  3333  CAPS  NLM  Calcular  Estado impressão
```

Figura 31 – Ambiente do HyperTerminal

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os valores obtidos pelo circuito em funcionamento, em comparação aos projetados e estudados previamente, apresentaram resultados bastante satisfatórios e condizentes com os valores calculados e simulados. Testes comparativos e testes de aferição do equipamento foram realizados e obtiveram êxito em ambos os casos. Este capítulo irá apresentar os resultados destes testes para validar o presente projeto.

4.1. *Teste de Aferição do Equipamento*

Este teste foi realizado com o objetivo de comprovar a precisão do equipamento na medição da temperatura da bobina do alto-falante. Para o desenvolvimento deste teste, foram necessários os seguintes materiais:

- 1 bobina com fio AWG31 de cobre, resistência inicial igual a $5,9\Omega$ e coeficiente de temperatura do fio igual a $0,00357\Omega^{-1}$;
- 1 bobina com fio AWG29 de alumínio, resistência inicial igual a $5,7\Omega$ e coeficiente de temperatura do fio igual a $0,00395\Omega^{-1}$;
- 500mL de óleo mineral 10A;
- 1 béquer;
- 1 gerador de ruído rosa Neutrik;
- 1 amplificador Studio R 3000W;
- 1 placa aquecedora elétrica Fisatom 503;
- 1 termômetro digital Salviterm 1200K;

Inicialmente foram escolhidas duas bobinas conforme figura 32, de materiais diferentes, para analisar o funcionamento do equipamento.

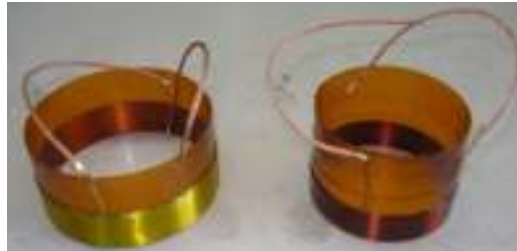


Figura 32 – Bobinas de alumínio e cobre

As bobinas foram, uma por vez, colocadas submersas no óleo mineral em agitação junto ao termômetro digital calibrado como mostra a figura 33.



Figura 33 – Teste de aferição

A temperatura do óleo em agitação e da bobina em uso é modificada com o auxílio de uma placa aquecedora elétrica e monitorada pelo termômetro em questão.

O ruído rosa aplicado na bobina é proveniente do equipamento gerador Neutrik, que é amplificado posteriormente atingindo o nível de tensão desejado. A potência utilizada no teste de aferição é relativamente baixa (20W), pois o aquecimento da bobina deve ser em função apenas do óleo mineral e não em função do sinal. O gerador Neutrik e o amplificador utilizado podem ser vistos nas figuras 34 e 35.



Figura 34 – Gerador de ruído Neutrik



Figura 35 – Amplificador StudioR

Depois de seguido os passos anteriores, obteve-se o resultado das medições da temperatura da bobina e comparado com a temperatura do óleo. Os gráficos a seguir demonstram o erro da leitura do equipamento em relação ao termômetro nos testes com as duas bobinas.

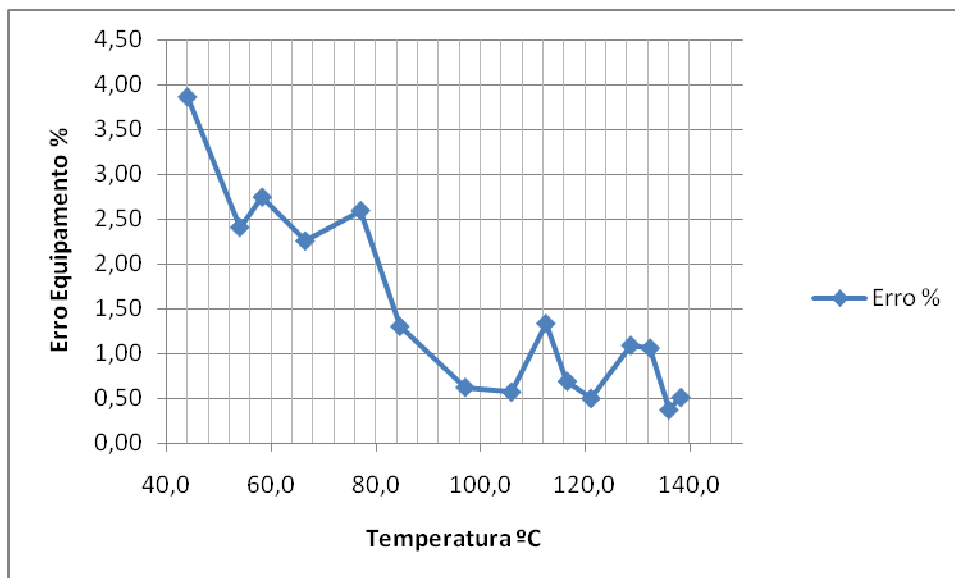


Figura 36 – Erro relativo Bobina de Alumínio

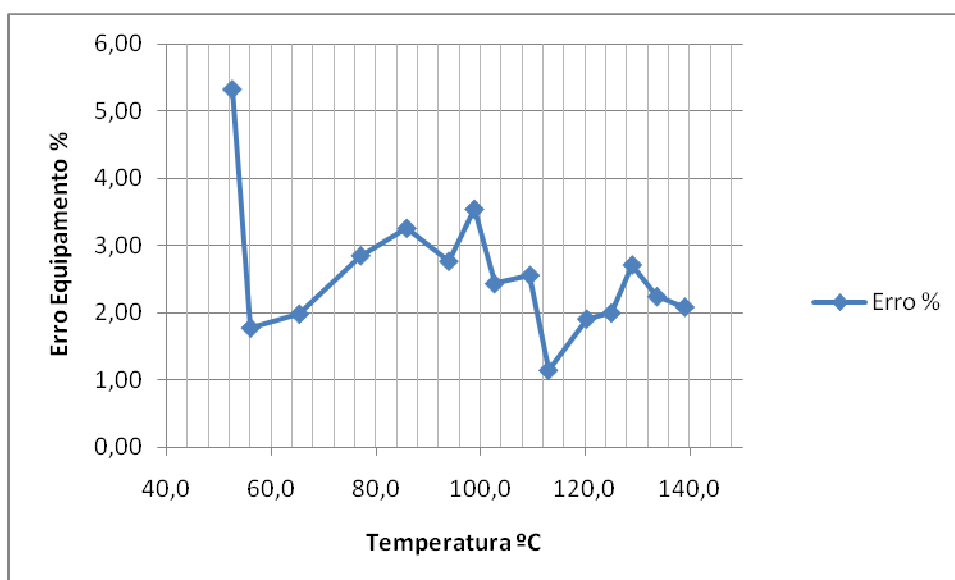


Figura 37 – Erro relativo Bobina de Cobre

Nos dois resultados o valor lido pelo equipamento projetado em relação ao termômetro digital demonstrou um erro muito pequeno, tornando-o um equipamento viável e de confiança.

4.2. Testes Comparativos

Além do teste de aferição apresentado anteriormente, testes comparativos com outro equipamento do mercado foram realizados e obtiveram resultados semelhantes. As desvantagens do equipamento “*Voice Coil Temperature Meter*”, fabricado pela empresa ONSOKU, são o alto custo no mercado e a tecnologia obsoleta aplicada, além da assistência técnica precária.

Foram testados três diferentes tipos de alto-falante, com impedâncias diferentes, assim como o tipo de bobina e a potência suportada pela mesma.

No primeiro teste foi utilizado um alto-falante de 12” com resistência da bobina igual a $7,1\Omega$. A potência aplicada foi de 200W. A figura 38 demonstra o gráfico das medições dos dois equipamentos em função do tempo de operação, e a figura 39 mostra o erro relativo do projeto em relação ao equipamento ONSOKU.

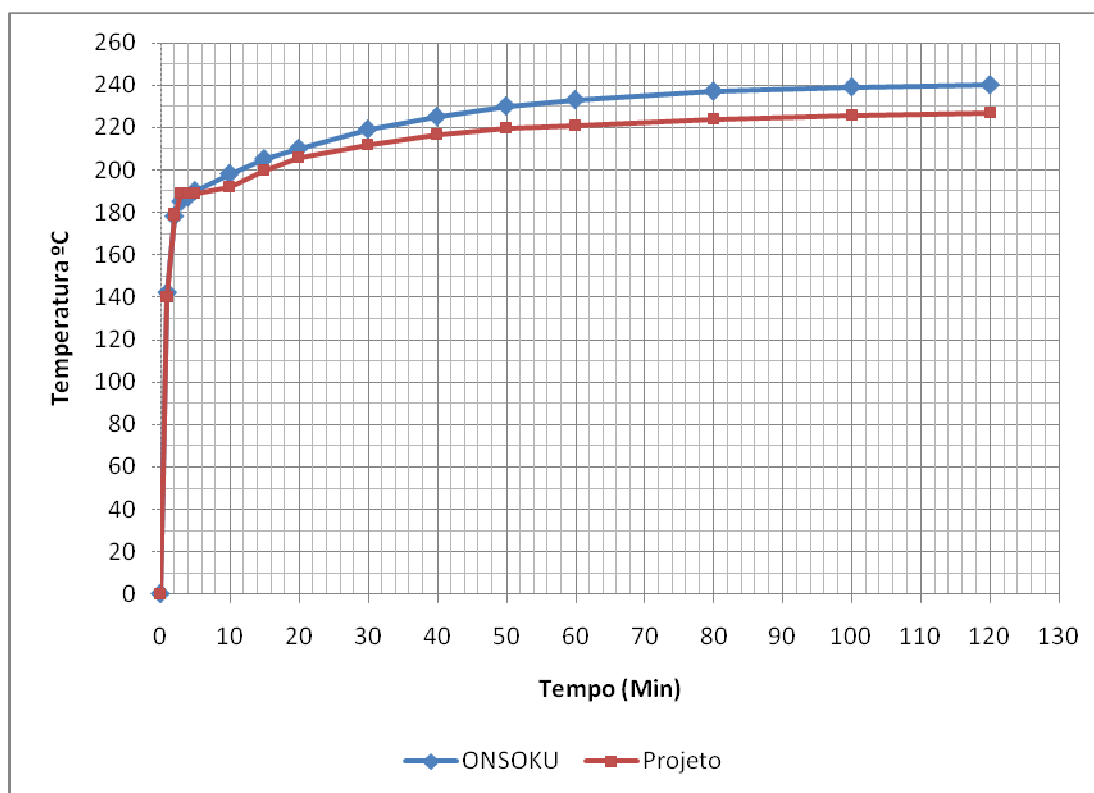


Figura 38 – Comparativo 12SW14A

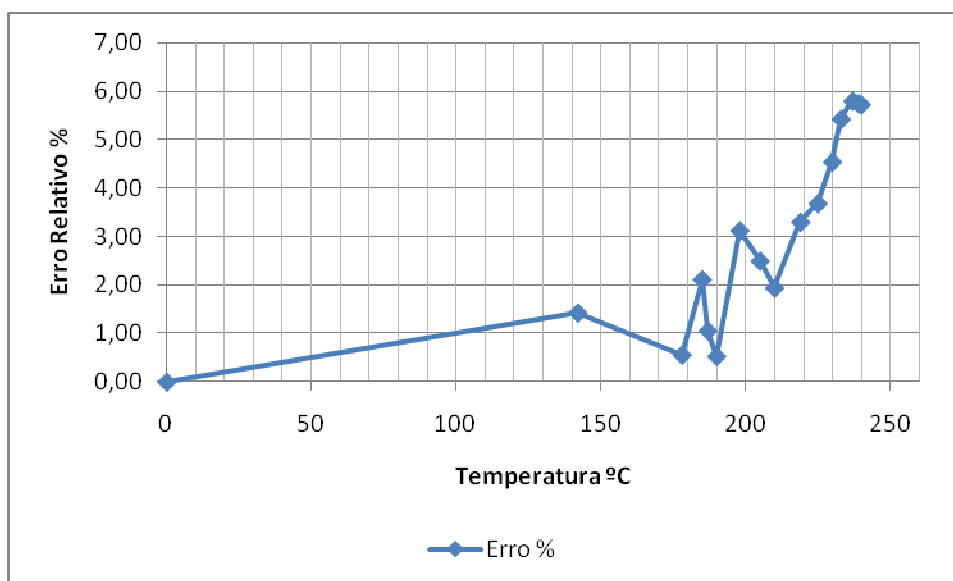


Figura 39 – Erro Relativo 12SW14A

No segundo teste foi utilizado um alto-falante de 6” com resistência da bobina igual a $3,7\Omega$. A potência aplicada foi de 60W. A figura 40 demonstra o gráfico das medições dos dois equipamentos em função do tempo de operação, e a figura 41 mostra o erro relativo do projeto em relação ao equipamento ONSOKU.

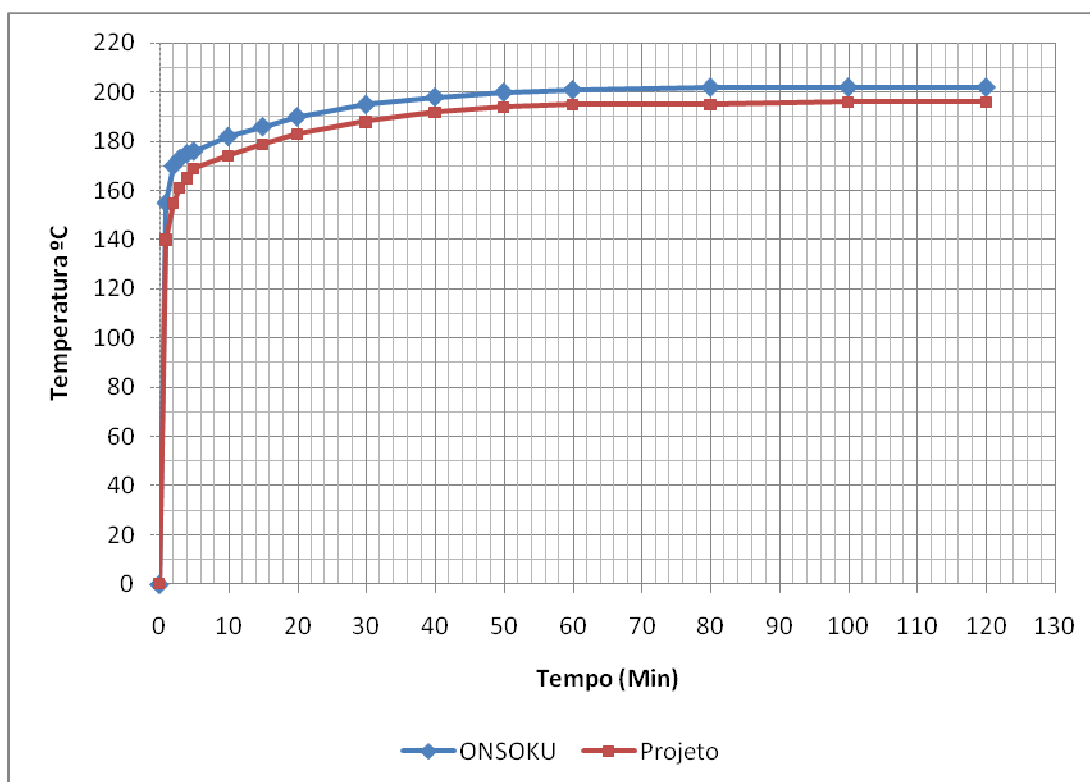


Figura 40 – Comparativo 6TR4A

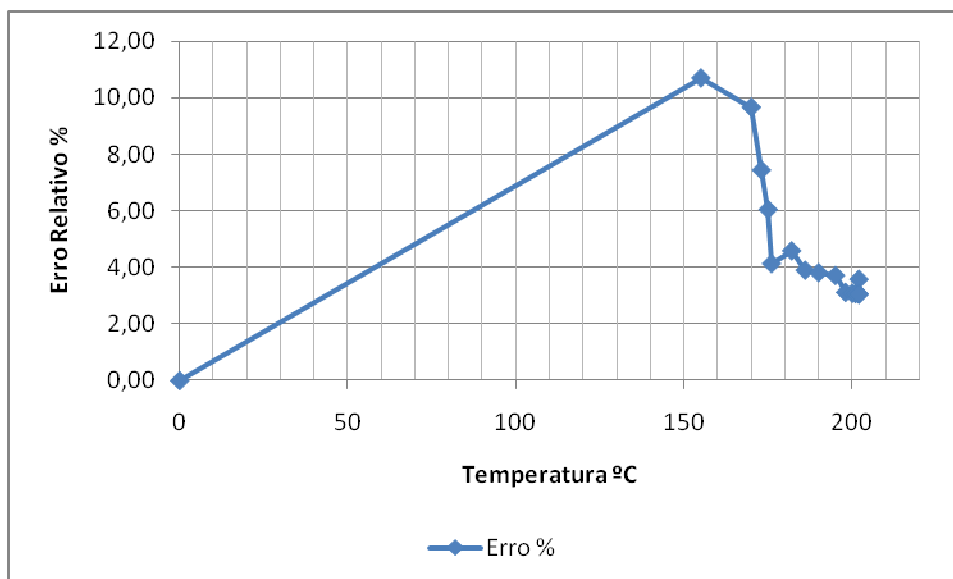


Figura 41 – Erro Relativo 6TR4A

No terceiro e último teste foi utilizado um alto-falante de 6” com resistência da bobina igual a $6,6\Omega$. A potência aplicada foi de 100W. A figura 42 demonstra o gráfico das medições dos dois equipamentos em função do tempo de operação, e a figura 43 mostra o erro relativo do projeto em relação ao equipamento ONSOKU.

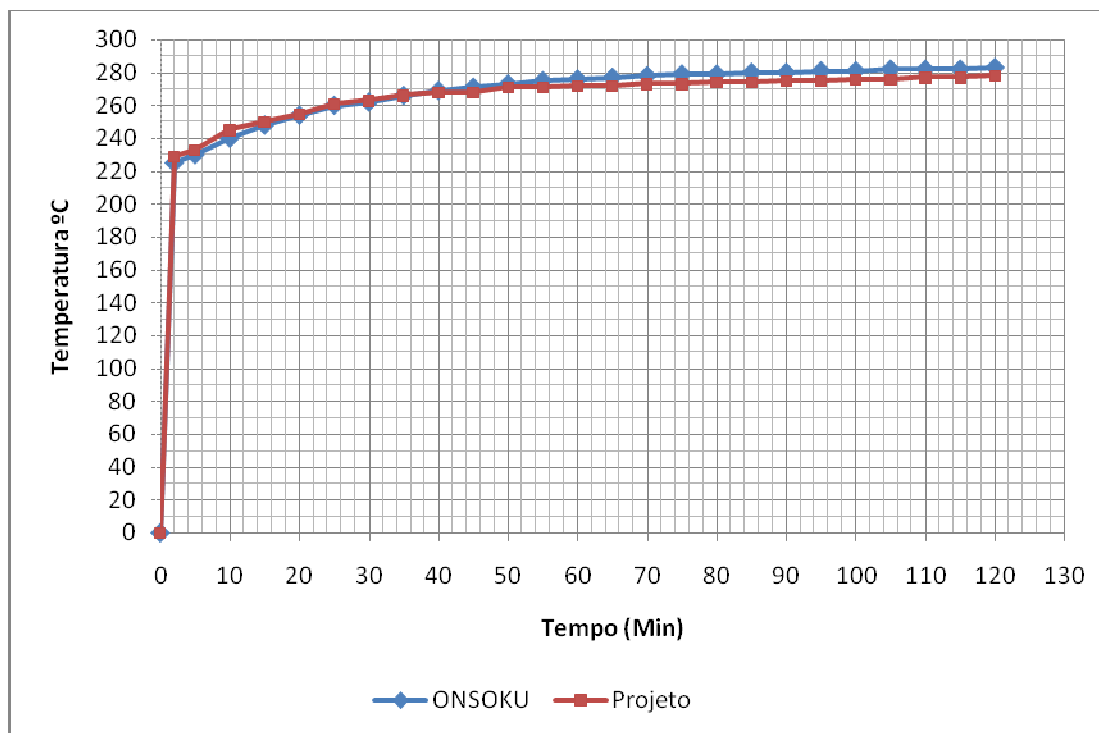


Figura 42 – Comparativo 6W4P

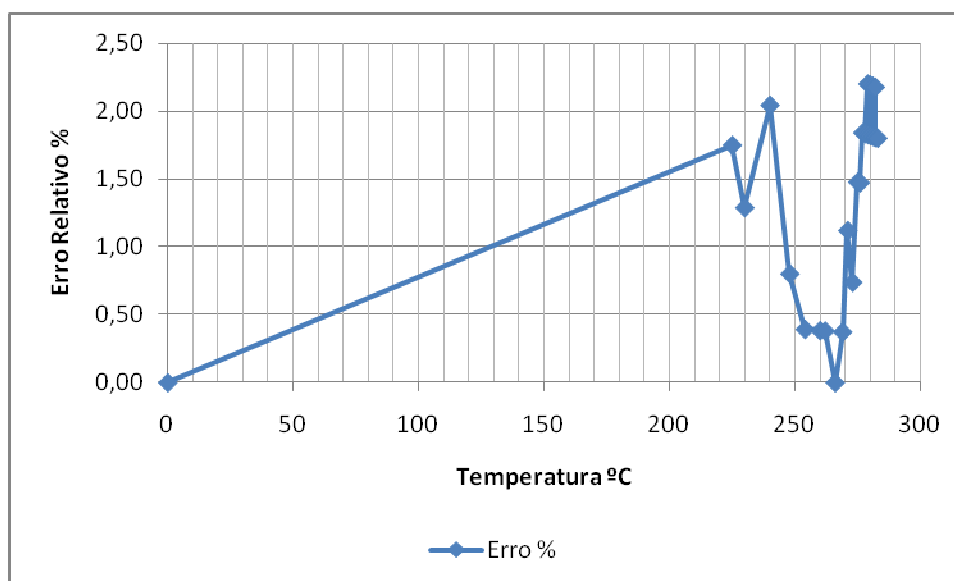


Figura 43 – Erro Relativo 6W4P

4.3. Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos pelo equipamento projetado foram extremamente coerentes com os valores calculados, simulados e medidos. Equipamentos



calibrados foram utilizados e testes de aferição foram realizados para comprovar a veracidade destes resultados, ratificando a viabilidade da utilização do equipamento projetado em áreas de pesquisa e desenvolvimento de alto-falantes.

Ficam como sugestões para trabalhos futuros, aprimorar a apresentação dos resultados obtidos do microcontrolador ou elaborar a comunicação deste projeto com softwares de pesquisa como LabVIEW, onde se tornaria possível a multiplexação e análise de mais de um canal de monitoramento da temperatura. É possível, também, implementar este projeto em sistemas de PA (*Public Address*), que são sistemas voltados para festas, shows ou espetáculos de grande porte e que poderiam ser melhor controlados quanto à temperatura de operação, inclusive quando estiverem diretamente expostos ao sol e, por isso, trabalhando em condições bem extremas.



5. REFERÊNCIAS

DICKASON, Vance – Caixas Acústicas & Alto-Falantes. Tradução: Homero Sette Silva. 5a. Ed. – Rio de Janeiro: H.Sheldon, 1997.

BORWICK, John – Loudspeaker and Headphone Handbook. Butterworth – Heinemann Ltd. 1988.

BORTONI, Constâncio – Desenvolvimento de um Método de Controle em Tempo Real da Temperatura da Bobina e do Deslocamento do Cone de Alto-Falantes para Operação em Alta Potência. Tese de Mestrado – UFSC. Florianópolis, 2005.

BEHLER, Gottfried – Measuring the Loudspeaker Impedence During Operation for Derivation of the Voice Coil Temperature. 98th AES Convention. Paris, 1995.

BOHN, Gustavo Pigatto – Desenvolvimento de um Alto-Falante Utilizando Ímã de Neodímio. Monografia de Graduação – ULBRA – Canoas, 2005.

COLLOMS, Martin – High Performance Loudspeaker – 5a. Ed. – New York: Wiley, 1997.

SILVA, Carlos Correia e SETTE, Homero – Alto Falantes e Caixas Acústicas, Características e Utilização. 1º SEMEA – Seminário de Engenharia de Áudio. – Belo Horizonte, 2002.



SETTE, Homero – Variação da Resistência da Bobina Móvel em Função da Temperatura. 4º Congresso da AES. Brasil, 2000.

SETTE, Homero – O Alto Falante para Regime de Grandes Sinais. 1º Congresso da AES. Brasil, 1996.

SETTE, Homero – Limitando a Potência em Drivers e Alto-Falantes. 9º Congresso da AES. São Paulo, 2005.

PEREIRA, Fábio – Microcontroladores PIC, Programação em C. – 7a. Ed. – São Paulo: Érica, 2007.

HENRICKSEN, Cliff – Heat Transfer Mechanisms in Moving-Coil Loudspeakers. 57th Convention AES. Los Angeles, 1977.

MARINHO, José Edson dos Santos e Ednaldo dos Santos – Mini-curso de Microcontrolador. Saber Eletrônica Especial nº 2. Jan/2001.

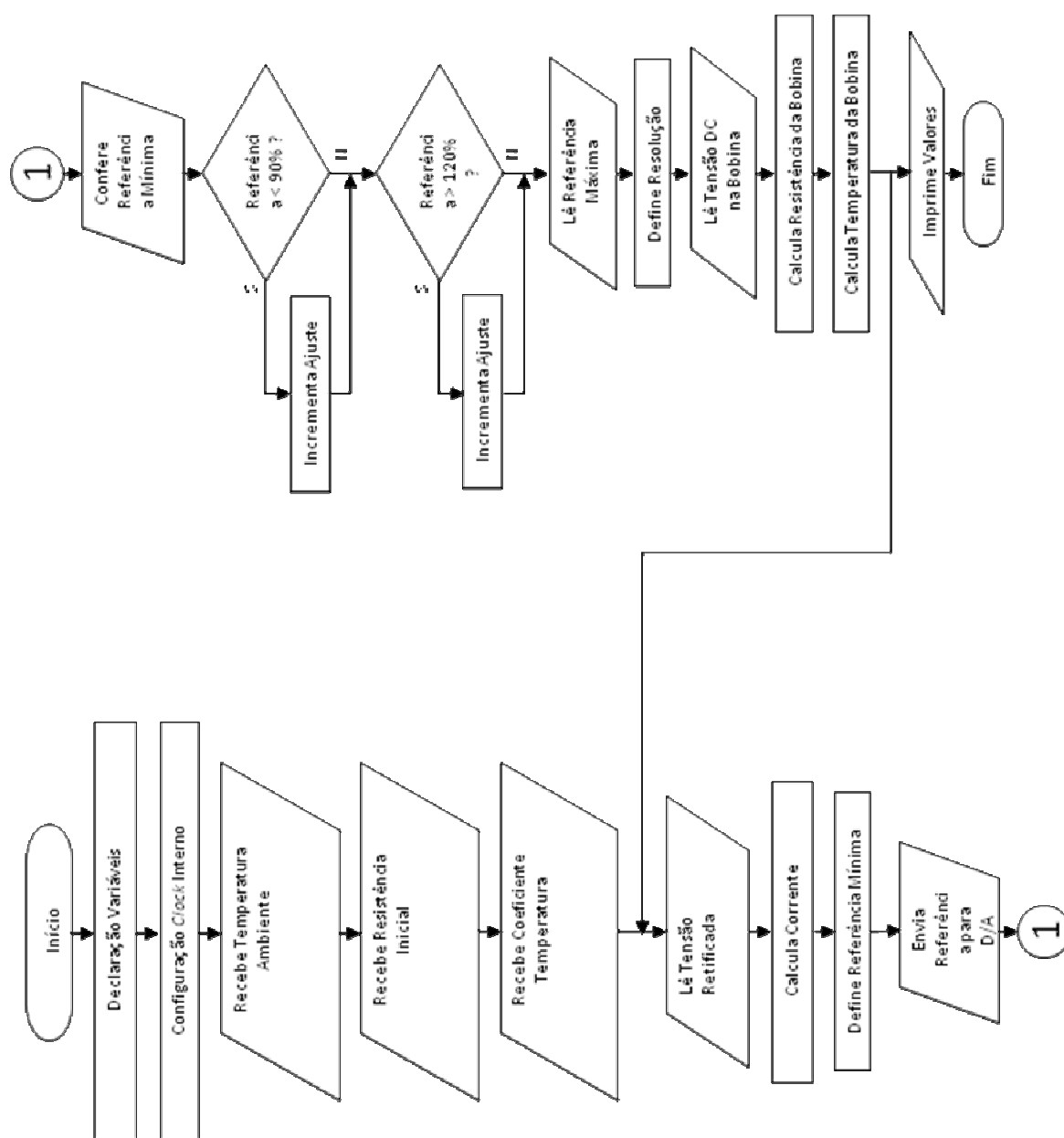
GUEDES, Larissa de Matos e BRITO, Thiago Moreira – Conversor Monofásico Semi-controlado. Monografia de Graduação – Universidade Federal de Goiás – Goiânia, 2003.

DUTTA, Pulak e HORN, Paul M. – Low-frequency fluctuations in solids: 1/f noise. 1981.

Eletrônica Selenium SA. Linha Profissional, disponível em:
<http://www.selenium.com.br/site2004/>

Datasheets dos componentes, disponíveis em: www.alldatasheet.com

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DA PROGRAMAÇÃO





APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR EM C

```
#include <16F877A.h> //biblioteca de funções p/PIC 16F877
#device ADC=10 // 10 bits max aceito por este PIC
#use delay(clock=2000000) // Cristal instalado na placa do PIC
#fuses HS,NOWDT,NOPUT,NOBROWNOUT,NOLVP,NOPROTECT // noprotect(cód não protegido)
#use rs232(baud=19200, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7) //uso da serial pino tx e rx
#include <stdlib.h>

int TAmbiente(); // Protótipo da função TAmbiente
float RE(); // Protótipo da função RE
float a25(); // Protótipo da função Coeficiente de temperatura a25
float VRetificado (); // Protótipo da função Tensao Retificada
float VDC (); // Protótipo da função Tensao DC na Bobina
float Referencia (); // Protótipo da função Referencia Minima
float Referencia2 (); // Protótipo da função Referencia Maxima
int j;

main()
{
    int temp=0,cont=0;
    float resistencia, v1, v1b, i, tb=0, rb, refmin, refmax, resolucao, coeficiente;
    float ref=0, reflida=0, ref2lida=0;
    int16 ref2, ajuste=0;

    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //utilizar o clock interno do A/D
    delay_ms(1000); //tempo para circuito estabilizar
    printf("\fDigite o valor da temperatura ambiente: ");
    temp=TAmbiente(); //Leitura da temperatura ambiente
    printf("Digite o valor do Re: ");
    resistencia = RE(); //Leitura da resistencia inicial da bobina
    printf("Digite o valor do coeficiente de temperatura do fio (a25): ");
    coeficiente = a25(); //Leitura do coeficiente de temperatura do fio da bobina

    while (true) // enquanto verdadeiro, repete:
    {
        for(cont=0 ; cont<20 ; ++cont) //Rotina para leitura de 20 valores de tudo
        {
            ref = VRetificado(); //Leitura da tensao de referencia
            i = ref / 1200; //Calculo da corrente continua
            refmin = i * resistencia; //Define valor da referencia minima calculada
            ref2 = (int16)(refmin * 255 / 5) + ajuste; //Converte valor de 10bits p/ 8bits
            output_b(ref2); //Envia valor da referencia para o D/A
            reflida = Referencia(); //Verifica valor de referencia minima lida
            if ((reflida * 5 / 1024) < (refmin * 0.9)) //Compara valor referencia calculado e medido
                ++ajuste; //Incrementa valor caso referencia menor que 90% do calculado
            if ((reflida * 5 / 1024) > (refmin * 1.2)) //Verifica se valor calculado está acima de 20%
                --ajuste; //Decrementa caso valor passa 20% do calculado
            refmax = 2.2 * refmin; //Define referencia maxima calculada
            ref2lida = Referencia2(); //Verifica referencia maxima lida
            resolucao = ((ref2lida - reflida) * 5 / 1024) / 1024; //Calculo da resolucao do A/D
            v1 = VDC(); //Leitura tensao DC na bobina
            v1b = (reflida * 5 / 1024) + resolucao * v1; //Calculo da tensao DC na bobina
            v1b = v1b + v1b/10; //Ajuste do valor da tensao
        }
    }
}
```



```
        rb = v1b / i; //Calculo da resistencia instantanea da bobina
        tb = tb + temp + (rb / resistencia - 1) * (temp - 25 + 1 / coeficiente); //Calculo da temperatura
    }
    tb = tb / 20; //Média dos 20 valores de temperatura medidos e calculados
    printf("\nTemperatura Ambiente: %d \n\r",temp); //Imprime temperatura ambiente
    printf("Resistencia inicial da Bobina: %f \n\r",resistencia); //Imprime RE
    printf("Coeficiente de temperatura do fio: %.5f \n\r", coeficiente); //Imprime coeficiente
    printf("Resistencia da Bobina: %f \n\r",rb); //Imprime resistencia instantanea da bobina
    printf("Temperatura da Bobina: %.1f \n\r", tb); //Imprime temperatura instantanea da bobina
}
}
//FUNCAO PARA LEITURA DA TENSAO DC NA BOBINA
float VDC ()
{
    float b=0;
    setup_adc_ports(ANALOG_RA3_RA2_REF); //RAO analógica. RA3 e RA2 Referencias
    delay_ms(100);
    set_adc_channel(0); //seleciona canal analógico 0
    delay_us(50);
    for(j=0 ; j<50 ; ++j) //Rotina para leitura de 50 valores de tensao DC na bobina
    {
        b = b + (float)read_adc(); //Leitura da tensao
        delay_ms(1);
    }
    b = b / 50; //Faz a média dos 50 valores de tensao referencia lidos no A/D.
    delay_ms(10);
    return (b); //Retorna valor medido
}

//FUNCAO PARA LEITURA DA TENSAO RETIFICADA NO BANCO DE CAPACITORES
float VRetificado ()
{
    float a=0;
    setup_adc_ports(ALL_ANALOG); //Todas entradas analógicas.
    delay_ms(10);
    set_adc_channel(1); //Seleciona canal analogico 1
    delay_us(50);
    for(j=0 ; j<20 ; ++j) //Rotina para leitura de 20 valores de tensao retificada
    {
        a = a + (float)read_adc() * 5 / 1024; //Leitura da tensao retificada
        delay_ms(1);
    }
    a = a / 20 * 49; //Média dos 20 valores * divisor de tensao real
    return (a); //Retorna valor medido
}

//FUNCAO PARA LEITURA DA TENSAO REFERENCIA MINIMA
float Referencia ()
{
    float c=0;
    setup_adc_ports(ALL_ANALOG); //Todas entradas analógicas.
    delay_ms(10);
    set_adc_channel(2); //Seleciona canal analogico 2
    delay_us(50);
    for(j=0 ; j<10 ; ++j) //Rotina para leitura de 10 valores de tensao retificada
    {
        c = c + (float)read_adc(); //Leitura da referencia
        delay_ms(1);
    }
    c = c / 10; //Média dos 10 valores lidos
    return (c); //Retorna valor medido
}

//FUNCAO PARA LEITURA DA TENSAO REFERENCIA MAXIMA
float Referencia2 ()
{
    float d=0;
    setup_adc_ports(ALL_ANALOG); //Todas entradas analógicas.
    delay_ms(10);
    set_adc_channel(3); //Seleciona canal analogico 3
    delay_us(50);
    for(j=0 ; j<10 ; ++j) //Rotina para leitura de 10 valores de tensao retificada
    {
        d = d + (float)read_adc(); //Leitura da referencia
        delay_ms(1);
    }
}
```



```
    }
    d = d / 10; //Média dos 10 valores lidos
    return (d); //Retorna valor medido
}

//FUNCAO PARA LEITURA DA TEMPERATURA AMBIENTE
int TAmbiente ()
{
    int size = 0;
    char c, tamb[3];

    while (true)
    {
        c = getc();
        if ( c >= 48 && c <= 57)
        {
            tamb[size] = c;
            printf ( "%c", c);
            size++;
        }
        if ( size > 1)
            break;
    }
    printf ("\r\n");
    return atol (tamb);
}

//FUNCAO PARA LEITURA DA RESISTENCIA DA BOBINA
float RE ()
{
    int size = 0;
    char c, res[4];

    while (true)
    {
        c = getc();
        if ((c >= 48 && c <= 57) || c == 46)
        {
            res[size] = c;
            printf ( "%c", c);
            size++;
        }
        if ( size > 2)
            break;
    }
    printf ( "\r\n");
    return atof (res);
}

//FUNCAO PARA LEITURA DO COEFICIENTE DE TEMPERATURA A25
float a25 ()
{
    int size = 0;
    char c, coef[8];

    while (true)
    {
        c = getc();
        if ((c >= 48 && c <= 57) || c == 46)
        {
            coef[size] = c;
            printf ( "%c", c);
            size++;
        }
        if ( size > 6)
            break;
    }
    printf ( "\r\n");
    return atof (coef);
}
```

APÊNDICE C – AMBIENTE DE TESTES





ANEXO A – CATÁLOGO ALTO-FALANTE 15SW1P