

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

***Campus* DIVINÓPOLIS**

**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE  
DE TEMPERATURA EM UM ALTO FALANTE UTILIZANDO UM  
MÉTODO NUMÉRICO COM AUXÍLIO COMPUTACIONAL.**

**Thiago Silveira da Costa**

**Divinópolis, 2013.**

**Thiago Silveira da Costa**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE  
DE TEMPERATURA EM UM ALTO FALANTE UTILIZANDO UM  
MÉTODO NUMÉRICO COM AUXÍLIO COMPUTACIONAL.**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Eixos de Formação: Elétrica, Mecânica

Orientador: Evandro Fockink da Silva

**Divinópolis, 2013.**



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**

**CEFET-MG / Campus Divinópolis**

**Curso de Engenharia Mecatrônica**

Monografia intitulada "*Desenvolvimento de uma metodologia para análise de temperatura em um alto falante utilizando um método numérico com auxílio computacional*", de autoria do graduando Thiago Silveira da Costa, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva - CEFET-MG / Campus Divinópolis - Orientador

---

Prof. Dr. Renato de Souza Dâmaso - CEFET-MG / Campus Divinópolis

---

Prof. Dr. Rodrigo Alves - CEFET-MG / Campus Divinópolis

---

Prof. Dr. Wagner Custódio de Oliveira - CEFET-MG / Campus Divinópolis

---

Prof. Dr. Valter Junior de Souza Leite

Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica

CEFET-MG / Campus Divinópolis

Divinópolis - Abril de 2013

## RESUMO

Este trabalho consiste na proposta de uma metodologia para simulação de transferência de calor em um alto falante automotivo. São abordados temas como conceitos de elétrica aplicadas a condutores, conceitos de transferência de calor, montagem de um circuito para estimativa da temperatura da bobina de um alto falante em funcionamento, parametrização do alto falante para simulação utilizando elementos finitos e simulação das temperaturas do alto falante em funcionamento.

**Palavras chaves:** alto falante, temperatura na bobina, simulação térmica.

## **ABSTRACT**

This work is the proposal of a methodology to simulate heat transfer in an automotive loudspeaker. Are discussed topics like fundamentals of electrical conductors, fundamentals of heat transfer, assembly of a circuit to estimate the temperature of the coil of a loudspeaker in operation, parameterization of simulation of the temperature of the loudspeaker under operation using computational simulation.

**Keywords:** loudspeaker, voice coil temperature, thermal simulation.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Evandro Fockink, pela confiança, pela amizade e orientação para a realização deste trabalho.

Ao professor Luiz Cláudio pela amizade e apoio.

Ao professor Renato Dâmaso, pelas orientações que fizeram com que este trabalho fosse realizado com qualidade.

Aos demais professores, por darem bases para realização deste trabalho e para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Aos meus pais, Pedro e Helena, e irmãos, Lucas e Sarah, pelo incentivo para que eu tivesse perseverança para alcançar o objetivo de obter o título de Engenheiro Mecatrônico.

A minha namorada, Mariane, pela compreensão e suporte nos momentos difíceis.

A Edgard Oliveira, por proporcionar a oportunidade para visualizar este trabalho, pelo conhecimento passado e pelo apoio.

# SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT .....	14
AGRADECIMENTOS .....	15
SUMÁRIO.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Motivação.....	10
1.1. Objetivos do trabalho .....	10
1.2. Revisão de literatura .....	11
1.3. Lei de Ohm.....	14
1.4. Variação da resistência com a temperatura .....	15
1.5. Modos de transferência de calor .....	15
1.5.1. Transferência de calor por condução .....	16
1.5.2. Convecção natural.....	16
1.5.3. Radiação .....	16
1.6. Equações de transferência de calor.....	17
1.7. Modelagem em Dinâmica de Fluidos Computacional .....	18
1.7.1. Método dos elementos finitos .....	18
1.7.2. Equações gerais para o fluxo de fluido e transferência de calor.....	21
1.8. Organização do trabalho .....	23
2. METODOLOGIA .....	24
2.1. Escolha do software.....	24
2.2. Aspectos gerais da geometria.....	24
2.3. Modelagem da bobina.....	26
2.3.1. Estimativa da temperatura na bobina .....	27

2.3.2. Procedimentos para estimar a temperatura na bobina .....	29
2.4. Modelagem do gap.....	30
2.5. Condições de contorno .....	31
2.6. Obtenção dos parâmetros para simulação.....	33
3. VALIDAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO .....	39
3.1. Resultados das simulações.....	42
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
4.1. Sugestão para trabalhos futuros .....	46
REFERÊNCIAS.....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estrutura geral do alto falante .....	11
Figura 1.2 - Forças de Lorentz aplicadas na bobina do alto falante .....	12
Figura 1.3 - Representação da discretização de um sólido.....	20
Figura 2.1 - Geometria a ser utilizada nas simulações.....	25
Figura 2.2 - Alterações realizadas no t-yoke .....	26
Figura 2.3 - Geometria discretizada por elementos finitos .....	26
Figura 2.4 - Estrutura da bobina considerada como casca cilíndrica .....	27
Figura 2.5 - Circuito utilizado para obtenção de parâmetros elétricos do alto falante em operação. ....	28
Figura 2.6 - Dispositivo montado.....	29
Figura 2.7 - Sistema montado para realizar o teste.....	29
Figura 2.8 - Sólidos gerados para modelagem do gap.....	30
Figura 2.9 - Superfície de aplicação da temperatura da bobina.....	31
Figura 2.10 - Configuração de Chimney.....	32
Figura 2.11 - Caixa de ar que envolve o alto falante .....	33
Figura 2.12 - Superfícies de referência para ajuste dos parâmetros.....	35
Figura 3.1 - Configuração da condutividade térmica do Ar Placa.....	40
Figura 3.2 - Configuração da condutividade térmica do Ar T-yoke.....	40
Figura 3.3 - Configuração da solução .....	41
Figura 3.4 - Gráfico de convergência da simulação .....	41
Figura 3.5 - Tela de obtenção das temperaturas das superfícies.....	42
Figura 3.6 - Ar aquecido em movimento .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Descrição das variáveis das equações de CFD .....	23
Tabela 2.1 - Parâmetros Obtidos para parametrização do problema.....	33
Tabela 2.2 - Valores das resistências corrigidos .....	34
Tabela 2.3 - Temperaturas estimadas.....	34
Tabela 2.4 - Valores dos parâmetros obtidos após os ajustes .....	36
Tabela 2.5 - Condutividade térmica de Ar Placa e Ar T-yoke.....	37
Tabela 2.6 - Materiais dos componentes da geometria.....	38
Tabela 3.1 - Temperaturas Estimadas .....	39
Tabela 3.2 - Temperaturas Estimadas .....	39
Tabela 3.3 - Identificação da Superfície .....	42
Tabela 3.4 - Resultados para temperatura da bobina de 86,7°C .....	43
Tabela 3.5 - Resultados para temperatura da bobina de 107,3°C .....	43

# 1. INTRODUÇÃO

O alto falante é um dispositivo que transforma a energia elétrica em energia acústica. Um dispositivo considerado de alta eficiência tem 95% da potência transformada em calor. Neste trabalho, foi feita a análise da transferência de calor nesse dispositivo utilizando simulação computacional. Um dispositivo foi montado para obtenção de parâmetros elétricos do alto falante em funcionamento para que fosse possível estimar a temperatura na bobina. A geometria do alto falante foi modelada e simplificada e, por fim, foi proposta uma parametrização simplificada para obtenção de resultados próximos aos valores medidos. Com o resultado deste trabalho, poderão ser realizados estudos na estrutura do dispositivo com o objetivo de melhorar a dispersão de calor e evitar a degradação de adesivos.

## 1.1. Motivação

Um alto falante é um transdutor, um dispositivo que transforma um tipo de energia em outra. No caso do alto falante, a energia elétrica é transformada em energia acústica. Essa transformação é de baixa eficiência, sendo que as perdas são transformadas em calor. A possibilidade de estimar a temperatura de um alto falante em operação, e com isso reduzir o número de protótipos necessários, permite que um projeto possa ser otimizado, o que pode aumentar a capacidade térmica do dispositivo e resultar em aumento da potência nominal. Além disso, seria possível reduzir custos de produção e tempo para início da produção de um novo produto.

## 1.1. Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é definir e realizar etapas para simular o gradiente de temperaturas de um alto falante em operação. Para que isso seja alcançado, foram definidos os objetivos específicos:

- Construir um dispositivo para estimar a temperatura da bobina do alto falante em operação
- Modelar a geometria do alto falante para simular utilizando o método dos elementos finitos
- Parametrizar o alto falante em regime permanente para estimar a temperatura em um ponto qualquer.
- Validar os resultados obtidos das simulações através de medições feitas no dispositivo real em operação.

## 1.2. Revisão de literatura

A estrutura de um alto falante, conforme pode ser observada na figura 1.1, é composta de três partes principais: uma estrutura mecânica vibracional, uma estrutura fixa e uma unidade motora. A primeira consiste em uma membrana, uma capa, a bobina e a centragem que são fixadas na estrutura fixa. Esta, por sua vez, é a carcaça do alto falante. Já unidade motora consiste no circuito magnético e também é fixada na carcaça. A estrutura geral é montada de forma que a bobina é posicionada em um espaço, chamado entreferro ou *gap* radial.

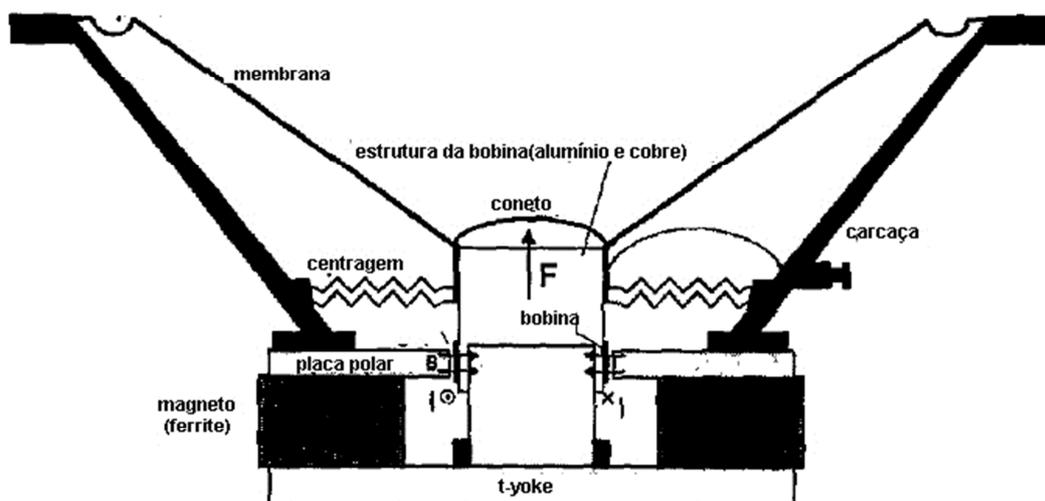


Figura 1.1 - Estrutura geral do alto falante (Adaptada de BEHLER e BERNHARD, 1998)

O princípio de funcionamento do alto falante é baseado na aplicação da Lei de Lorentz, explicada a partir da Figura 1.2.

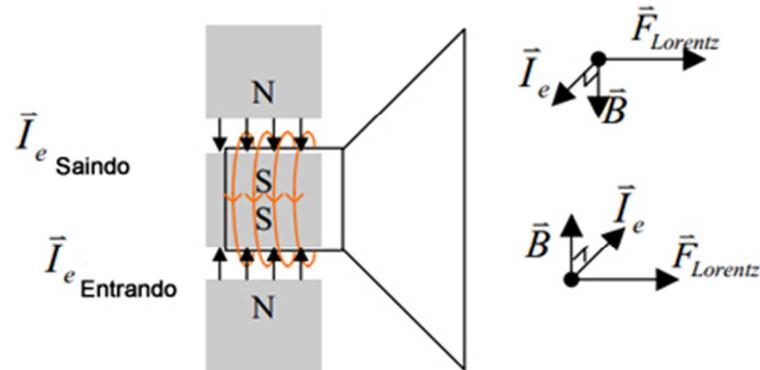


Figura 1.2 - Forças de Lorentz aplicadas na bobina do alto falante (Adaptada de LUNARDI, 2004)

Como se nota nesta imagem, se uma onda senoidal é enviada ao dispositivo na magnitude máxima, uma corrente ( $I_e(t)$ ) flui no condutor da bobina no sentido indicado pelas setas nas linhas que circulam a bobina. No ponto máximo da senóide, a corrente é direcionada perpendicularmente ao plano da página e para cima, já no ponto mínimo, a corrente é direcionada perpendicularmente ao plano da página e para baixo. As setas em negrito no *gap* representam o campo magnético gerado pelo ímã.

As forças de Lorentz podem ser calculadas pela equação:

$$\vec{F}_{Lorentz} = q\vec{V}_e \times \vec{B} \quad (1)$$

Quando a senóide está no ponto máximo, a bobina é empurrada para fora do *gap* por uma força máxima. Já quando a senóide está no mínimo, a corrente inverte de direção e as forças de Lorentz puxam o cone de volta para o *gap*.

Como consequência dessa interação, um movimento axial da estrutura móvel é criado. A estrutura que vibra, a membrana, desloca o ar na faixa de frequências de áudio (KREITMEIR, 2002).

Uma das mais importantes características de desempenho de um alto falante é a potência nominal. Ela é determinada em função de diversos fatores, dentre eles:

- Aumento da temperatura da bobina e as limitações térmicas dos materiais que são afetados por essa temperatura;
- Níveis de distorção harmônica aceitáveis;
- Máxima deflexão do conjunto bobina e diafragma;
- Defeitos mecânicos causados pela operação.

A maior limitação para a capacidade da potência nominal de um alto falante é o aumento da temperatura da bobina. Temperaturas excessivas degradam os adesivos, revestimentos e estruturas dos materiais, levando à falha do dispositivo. (HENRICKSEN, 1987).

A eficiência da conversão elétrica para acústica é menor que 5%. Os outros 95% da potência aplicada no alto falante são transformados em calor, o qual é gerado no centro do alto falante. Sendo assim, o circuito magnético e a carcaça são utilizadas como caminhos térmicos para dissipar o calor proveniente da bobina. ( BUTTON, 1992).

A visualização dos fenômenos que ocorrem no interior do alto falante em funcionamento é dificultada pela impossibilidade de realizar medições diretas. Nesse escopo, aparece o modelamento matemático, que pode ser utilizado como ferramenta para estimar parâmetros envolvidos em algum fenômeno. O modelo criado resulta em equações que descrevem o fenômeno que podem ser resolvidas por métodos analíticos ou técnicas numéricas.

A solução através de métodos analíticos pode ser consideravelmente complexa dependendo do modelo obtido. A simulação numérica pode resolver problemas complexos com condições de contorno gerais definidas em geometrias também complexas, apresentando resultados com rapidez. A aplicação desse recurso em projetos pode reduzir sensivelmente tempo e custo. Na engenharia é necessária a associação adequada da simulação numérica com experiências selecionadas em laboratório. Essa união resultará em projetos melhores e mais baratos. (MALISKA, 2004).

O método dos elementos finitos (MEF), assim como outros métodos numéricos, tem sido largamente aplicados na análise térmica de motores elétricos e transformadores. Quando comparado com os elementos finitos, as diferenças finitas

tem a vantagem de ser mais fácil de implementar. No entanto, podem existir problemas em regiões arredondadas da geometria, existe a dificuldade na estabilização e convergência da análise e a dificuldade da adaptação da malha. Já o método dos volumes finitos, quando comparado com o método dos elementos finitos, tem a vantagem de ser baseado na conservação física das propriedades, no entanto, podem existir problemas em malhas não estruturadas e dificuldade na estabilização e convergência da análise (TSILI, 2010).

O MEF tem sido utilizado na simulação de alto falantes para auxiliar no projeto de componentes sem que sejam necessárias grandes quantidades de protótipos.(KREITMEIR, 2002).

O comportamento térmico da unidade motora de um alto falante foi analisado por DODD (2002) utilizando o método dos elementos finitos em 2D. O objetivo foi demonstrar como a aplicação deste método pode fornecer informações úteis como alternativa aos circuitos equivalentes utilizados em trabalhos anteriores. Como conclusão, o autor afirma que a análise térmica via método dos elementos finitos pode contribuir no projeto de alto falantes de forma rápida e com baixo custo.

Nas próximas seções serão apresentados princípios teóricos que, juntamente com os conceitos e definições apresentados anteriormente servirão de base para realização deste trabalho.

### **1.3. Lei de Ohm**

Resistência é a capacidade dos materiais de impedir o fluxo de corrente. Os elétrons que compõem a corrente elétrica interagem com a estrutura atômica do material em que estão se movimentando, a qual, por sua vez, resiste a eles. No decorrer dessas interações, uma parte da energia elétrica é convertida em energia térmica e dissipada sob a forma de calor (NILSSON, 2009). A relação algébrica entre tensão e corrente para um resistor é dada pela Lei de Ohm:

$$v = R \cdot i \tag{2}$$

Rearranjando a equação, encontramos o valor da resistência em um condutor em função da tensão e corrente.

$$R = \frac{v}{i} \quad (3)$$

#### 1.4. Variação da resistência com a temperatura

A resistência de um condutor varia com a temperatura. Para os metais, quando a temperatura aumenta, a resistência aumenta. Estudos experimentais, resultaram na relação descrita pela Equação 4

$$R(T) = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (4)$$

Onde  $R(T)$  é a resistência na temperatura  $T$ ,  $R_0$  é a resistência inicial do condutor,  $\alpha$  é o coeficiente térmico do material do condutor,  $T$  é a temperatura no instante e  $T_0$  é a temperatura inicial.

O coeficiente  $\alpha$  depende do material e, para um mesmo material, varia com a temperatura. Tal variação é pequena e pode ser considerada constante para um intervalo de temperatura.

#### 1.5. Modos de transferência de calor

De forma simplificada, transferência de calor pode ser definida como energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. Para realizar análises térmicas, é importante que o engenheiro entenda os mecanismos físicos que fundamentam os modos de transferência de calor e que seja capaz de usar as equações das taxas que determinam a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo (INCROPERA, 1990). Os três modos de transferência de calor são:

- Condução
- Convecção
- Radiação

### **1.5.1. Transferência de calor por condução**

Esse modo de transferência de calor é mantido pelas atividades atômicas e moleculares. A transferência de calor pode ser entendida como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre as partículas. Temperaturas mais altas estão associadas às energias moleculares mais altas e, quando moléculas vizinhas se chocam, uma transferência de energia das moléculas mais energéticas para as menos energéticas deve ocorrer. Esse tipo de transferência de calor depende profundamente das propriedades do meio e ocorre em sólidos, líquidos e gases onde uma diferença de temperatura existe.

### **1.5.2. Convecção natural**

As moléculas presentes nos líquidos e gases têm liberdade de movimento e ao movimentarem de uma região quente para uma fria, carregam energia. A transferência de calor de uma região para outra, devido ao movimento de um fluido ou gás, juntamente com a transferência de calor por condução no fluido, é chamada de transferência de calor por convecção. Quando o movimento do fluido é provocado pela variação da densidade causada pela diferença de temperaturas, essa situação é chamada de convecção natural. A convecção natural influencia significativamente as temperaturas de operação em dispositivos de geração de potência e eletrônicos (LEWIS; *et al*, 2004).

### **1.5.3. Radiação**

Todos os corpos emitem uma radiação em todas as temperaturas. Esse é o único modo que não depende de meio material para que a transferência de calor ocorra. A natureza dessa radiação térmica é tal, que a propagação de energia transportada por ondas eletromagnéticas é emitida de uma superfície de um corpo.

Quando essas ondas atingem outra superfície, uma parte é refletida, outra é transmitida e a restante é absorvida.

Os aspectos importantes na solução de problemas de transferência de calor são identificar os modos significantes e decidir se algum deles pode ser desprezado. (LEWIS; *et al*, 2004)

### 1.6. Equações de transferência de calor

É importante quantificar a energia que está sendo transferida por unidade de tempo e para isso é necessária a utilização das equações de taxa.

A equação de taxa de transferência de calor por condução é expressa, para uma dimensão, como:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Onde  $q_x$  é o fluxo de calor na direção  $x$ ,  $k$  é a condutividade térmica, uma propriedade do material, e  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura.

Para a transferência de calor por convecção, a equação de taxa é dada por:

$$q = h(T_w - T_a) \quad (6)$$

Onde  $q$  é o fluxo de calor por convecção,  $(T_w - T_a)$  é a diferença de temperatura entre a superfície externa do corpo e o fluido e  $h$  é o coeficiente de convecção.

O fluxo máximo de calor, que pode ser emitido por radiação por uma superfície preta é dado por:

$$q = \sigma T_w^4 \quad (7)$$

Onde  $q$  é o fluxo de calor por radiação,  $\sigma$  é a constante de Stefan- Boltzmann ( $5,699 \times 10^{-8}$ ) e  $T_w$  é a temperatura da superfície.

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor que o fluxo de calor emitido por uma superfície preta e é dado por:

$$q = \epsilon \sigma T_w^4 \quad (8)$$

No que diz respeito às leis da termodinâmica, a primeira lei é de interesse na resolução de problemas de transferência de calor. O aumento de energia em um sistema é igual à diferença entre a transferência de energia por calor para o sistema e a transferência de calor por trabalho realizado pelo sistema.:

$$dE = dQ - dW \quad (9)$$

Onde  $Q$  é o calor total que entra no sistema e  $W$  é o trabalho realizado.

Como o interesse está na taxa de energia transferida no processo de transferência de calor, a primeira lei da termodinâmica pode ser entendida como:

“ A taxa de aumento da energia de um sistema é igual à diferença entre a taxa com a qual a energia entra no sistema e a taxa com a qual o sistema realiza trabalho”.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} \quad (10)$$

Onde  $t$  é o instante de tempo.

## 1.7. Modelagem em Dinâmica de Fluidos Computacional

A Dinâmica de fluidos computacional (CFD), é derivada de diferentes disciplinas de mecânica dos fluidos e transferência de calor, também tem sido aplicado para outras importantes áreas como em processos químicos, engenharia civil, ambiental. A construção e otimização de projetos de sistemas através do auxílio da simulação computacional, resultam em aumento da eficiência e redução dos custos de um projeto (LEWIS; *et al*, 2004).

### 1.7.1. Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é uma ferramenta para determinar soluções aproximadas de diversos problemas que tem recebido atenção na engenharia e na

indústria pela diversidade e flexibilidade como ferramenta de análise (LEWIS; *et al*, 2004). É frequentemente necessário obter a solução numérica aproximada para problemas complexos de engenharia nos quais a solução analítica é de difícil obtenção. Apesar de ser possível de encontrar o modelo matemático para tais problemas, a solução analítica é difícil. A complexidade acontece por causa da arbitrariedade ou irregularidade da geometria.

Dentre os diversos métodos numéricos existentes, os mais comuns são: diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. O método das diferenças finitas tem boa estabilidade e é conceitualmente um método simples que necessita de aproximação pontual para as equações. O modelo, formado pelas equações a diferenças para um conjunto de pontos, pode ser melhorado aumentando o número de pontos. Apesar de vários problemas de transferência de calor poderem ser resolvidos utilizando o método das diferenças finitas, quando se trata de uma geometria complexa, essa técnica torna-se de difícil utilização.

O método dos volumes finitos é uma versão aprimorada do método das diferenças finitas e as resoluções dos problemas são baseadas nos balanços de massa, quantidade de movimento e energia de um volume em um meio contínuo. Assim como as diferenças finitas, tem o mesmo problema com geometrias complexas.

O método dos elementos finitos considera que a região de solução é composta de pequenas sub-regiões, ou elementos, conectados e dá uma aproximação linear por partes das equações, ou seja, as equações diferenciais são reduzidas para lineares e não-lineares. Sendo assim, a discretização por elementos finitos reduz o problema do contínuo, que tem infinitas incógnitas, para uma equação com um número finito de incógnitas em pontos especificados chamados de nós. Uma vez que o método dos elementos finitos permite a criação dos elementos, uma representação fechada das condições de contorno de domínios complicados é possível.

A solução de problemas contínuo através do método dos elementos finitos é alcançado seguindo os seguintes passos (LEWIS; *et al*, 2004):

#### **i. Discretização**

Dividir a região de solução em elementos. A discretização por elementos finitos permite a utilização de diversas formas de elementos, por exemplo, triângulos,

quadriláteros. Cada elemento é formado pela conexão de um determinado número de nós e esse número depende do tipo de elemento utilizado. O resultado da discretização é chamado de malha. Um exemplo pode ser visto na Figura 1.3

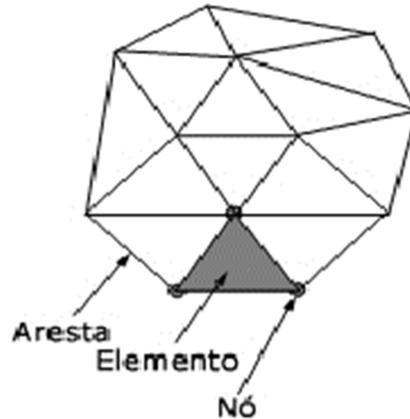


Figura 1.3 - Representação da discretização de um sólido(Lewis; *et al*, 2004).

## ii. Formulação

A matriz de equações que expressa as propriedades de cada elemento deve ser determinada através da criação de uma matriz de elementos do lado esquerdo a um vetor de cargas.

$$[K]_e = \frac{Ak}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\{f\} = \begin{bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde  $e$  representa um elemento,  $Q$  é a quantidade total de calor transferido,  $k$  é a condutividade térmica,  $l$  é o comprimento de um elemento em uma direção e  $i$  e  $j$  representam os nós que formam o elemento.

## iii. Montagem das equações.

Agrupar as equações dos elementos para obter um sistema de equações simultâneas para encontrar as propriedades de todo o sistema, ou seja, combinar as matrizes de equações de cada elemento de forma que a matriz resultante represente o comportamento de toda a região de solução do problema. As condições de contorno devem ser acrescentadas depois da união das contribuições individuais de cada elemento, ou seja:

$$[K]\{T\} = \{f\} \quad (13)$$

Onde  $[K]$  é a matriz global do lado esquerdo,  $\{f\}$  é o vetor global de cargas e  $\{T\}$  é o vetor de variáveis desconhecidas

#### iv. Solucionar o sistema de equações

O conjunto de equações algébricas resultantes deve ser resolvidas para obter os valores nodais da variável de interesse.

### 1.7.2. Equações gerais para o fluxo de fluido e transferência de calor

As equações diferenciais parciais que regem o fluxo de fluido e de transferência de calor na análise de fluido dinâmica computacional incluem a equação de continuidade, as equações de Navier-Stokes e a equação de energia. Estas equações são acopladas e não-lineares tornando a solução por métodos analíticos possível de ser realizadas a um número limitado de problemas. A maioria dos problemas práticos de interesse não se encaixa nessa categoria limitada. Dessa forma, métodos numéricos são usados para determinar a solução aproximada para essas equações. Existem vários métodos disponíveis para fazê-lo. As seções a seguir descrevem resumidamente o método utilizado pelo Autodesk Simulation CFD®. As equações para fluxo de fluido e transferência de calor são as equações de Navier-Stokes ou equação da conservação do momento e a primeira lei da termodinâmica ou equação da energia.

#### Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

#### Conservação do momento em x

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (15)$$

### Conservação do momento em y

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (16)$$

### Conservação do momento em z

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (17)$$

Os dois termos relacionados à fonte são para coordenadas rotativas e para as resistências distribuídas. O termo resistência distribuída pode ser escrito genericamente como:

$$S_{DR} = - \left( K_i + \frac{f}{D_H} \right) \frac{\rho V_i^2}{2} - C\mu V_i \quad (18)$$

Onde  $i$  refere-se à coordenada global de direção (u,v,w equação da conservação do momento)

O outro termo referente à fonte, do fluxo rotativo, pode ser escrito, de forma geral, como:

$$S_\omega = -2\rho\omega_i \times V_i - \rho\omega_i \times \omega_i \times r_i \quad (19)$$

Para fluidos incompressíveis, a equação da energia é escrita em termos da temperatura estática

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (20)$$

As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 1.1

Tabela 1.1 - Descrição das variáveis das equações de CFD

Variável	Descrição
$C_p$	Calor específico [ $J/(kg \cdot K)$ ]
$g_x, g_y, g_z$	Aceleração da gravidade nas direções x,y e z [ $m/s^2$ ]
$k$	Condutividade térmica [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]
$p$	Pressão [ $Pa$ ]
$qV$	Fonte de calor volumétrica [ $W$ ]
$T$	Temperatura [ $K$ ]
$t$	Tempo [ $s$ ]
$u$	Componente da velocidade na direção x [ $m/s$ ]
$v$	Componente da velocidade na direção y [ $m/s$ ]
$w$	Componente da velocidade na direção z [ $m/s$ ]
$\mu$	Viscosidade [ $Pa \cdot s$ ]
$\rho$	Densidade [ $kg/m^3$ ]

### 1.8. Organização do trabalho

Para além desta introdução, este trabalho está dividido em 2 capítulos cujo conteúdo é exposto a seguir, e, ainda, das considerações finais. Em Metodologia é descrito o procedimento realizado para parametrizar a simulação térmica do alto falante. Em Validação da Parametrização são apresentados os resultados das simulações realizadas para validar a parametrização proposta.

## 2. METODOLOGIA

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento do trabalho a partir da modelagem da geometria para simulação, até a parametrização da simulação das temperaturas no alto falante.

### 2.1. Escolha do software

Existem diversas opções de softwares para realizar as simulações em CFD. Atualmente podem ser encontradas, inclusive, versões de código aberto, como é o caso do OpenFOAM®.

O software escolhido para desenvolver este trabalho foi o Autodesk Simulation CFD. Escolhido, primeiramente, pelo fato de que a Autodesk permite que estudantes utilizem o software para fins acadêmicos sem nenhum custo. Um outro motivo é que este software tem uma versão que trabalha com o conceito de nuvem, o que reduziria o efeito de não possuir uma máquina robusta para realizar o processamento das informações. Nesse conceito, a parametrização é feita localmente, em uma interface instalada no computador do usuário e, ao iniciar a solução, em vez do software realizar os cálculos na própria máquina, ele envia a parametrização a um servidor que realiza os cálculos e envia os resultados de volta para o usuário. Esse recurso faz com que simulações de geometrias complexas possam ser realizadas em um tempo menor por utilizar máquinas dedicadas a efetuar os cálculos das simulações.

### 2.2. Aspectos gerais da geometria

Para realizar a simulação, o software discretiza a geometria em pequenos elementos, seguindo os conceitos de elementos finitos comentados nas seções anteriores. Quanto maior a complexidade da geometria, maior a quantidade de

elementos necessários para representá-la, e conseqüentemente, maior o número de cálculos necessários para obter os resultados.

O estudo realizado neste trabalho foi direcionado para o circuito magnético, cuja estrutura, composta pela bobina, t-yoke, placa polar e ferrite, pode ser observada na Figura 2.1. O restante da estrutura: carcaça, membrana, coneto e centragem não foram considerados. Essa simplificação foi feita considerando que é no circuito magnético onde existem componentes fixados por adesivos e que merecem maior atenção em relação à temperatura. Ao ser exposto a um calor elevado, o adesivo amolece o que pode proporcionar o deslocamento dos componentes fixados e até mesmo a separação deles. No primeiro caso, se houver deslocamento das peças, a concentricidade da bobina com o t-yoke ficará comprometida.

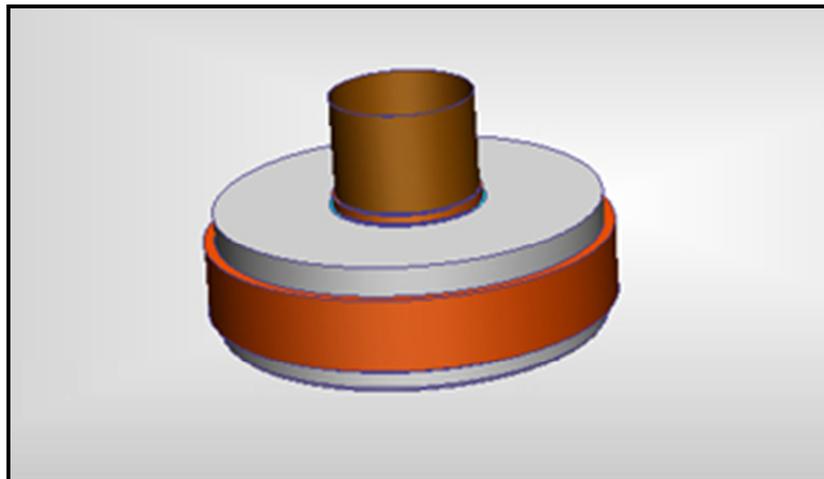


Figura 2.1 - Geometria a ser utilizada nas simulações

Nesta estrutura, placa polar e ferrite não foram alterados por possuírem geometria simples. O t-yoke possuía dois furos cônicos que foram simplificados para reduzir o número de elementos da malha e minimizar a possibilidade de erros de convergência. A geometria original e atualizada podem ser vistas na Figura 2.2

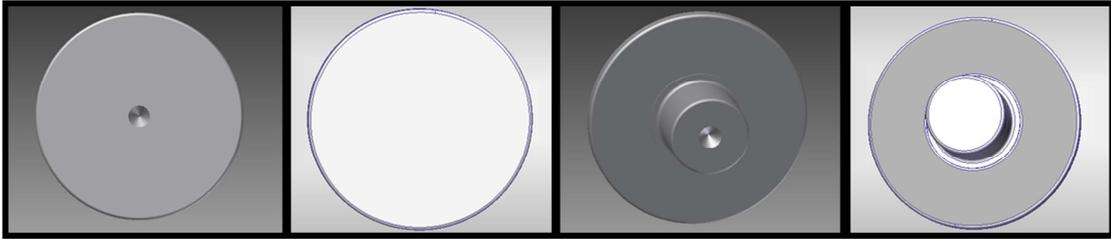


Figura 2.2 - Alterações realizadas no t-yoke

Com as alterações realizadas, o programa foi configurado para gerar a malha da geometria utilizando as configurações padrões e o resultado desta etapa é apresentado na Figura 2.3.

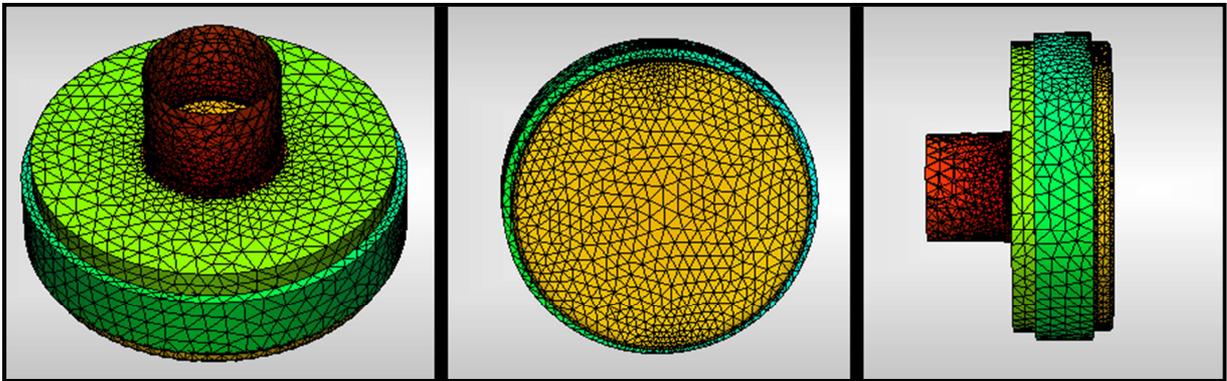


Figura 2.3 - Geometria discretizada por elementos finitos

A malha gerada para essa estrutura resultou em 36576 nós que deram origem a 150732 elementos, ou seja, o número de equações que foram geradas pelo software é igual ao número de elementos. Caso a carcaça tivesse sido considerada, este número seria aumentado significativamente.

### 2.3. Modelagem da bobina

O principal componente da bobina é o fio de cobre cujo diâmetro está entre 0,178 e 0,198 mm. Gerar elementos dessa ordem de grandeza elevaria consideravelmente o esforço necessário para discretizar a geometria que demandaria um tempo maior para a solução da simulação. Dessa forma, este enrolamento foi simplificado para uma casca cilíndrica, que está apresentada na Figura 2.4.

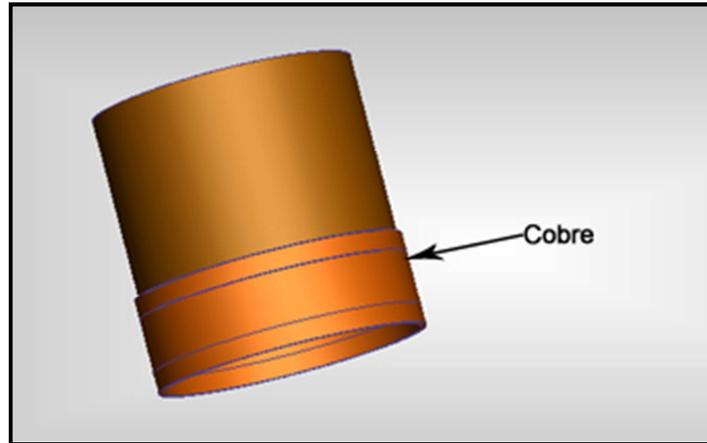


Figura 2.4 - Estrutura da bobina considerada como casca cilíndrica

### 2.3.1. Estimativa da temperatura na bobina

A bobina do alto falante é montada de tal forma que fica isolada do ambiente. Como consequência disso, a temperatura da bobina não pode ser medida de forma direta, como por exemplo, com a utilização de um termopar. Assim, estimar tal temperatura, podem ser utilizados conceitos da Lei de Joule e o princípio de que a resistência de um condutor varia com a temperatura. Logo, a temperatura do condutor pode ser encontrada, se sua resistência puder ser medida.

Rearranjando a Equação (3) para obtermos a temperatura temos:

$$T = \left(1 - \frac{R(T)}{R_0}\right) \frac{1}{\alpha} + T_0 \quad (21)$$

A resistência inicial do enrolamento de cobre pode ser mensurada diretamente utilizando um multímetro na escala de medição de resistência. A resistência do enrolamento com o dispositivo em operação não pode ser mensurada da mesma forma. Ela deve ser encontrada indiretamente utilizando a Lei de Ohm.

Surge então um problema, já que, em operação, o alto falante recebe sinais alternados. Com isso, calcular a resistência, deve-se passar uma corrente contínua conhecida no enrolamento e medir a tensão contínua sobre esse enrolamento. O valor de tensão encontrado e da corrente conhecida são aplicados na Equação (2) para obter o valor da resistência instantânea do enrolamento.

Para fornecer a corrente contínua ao alto falante em funcionamento, deve-se desacoplar o sinal alternado do sinal contínuo. O circuito utilizado foi proposto em (DICKASON, 2000) e é apresentado na Figura 2.5.

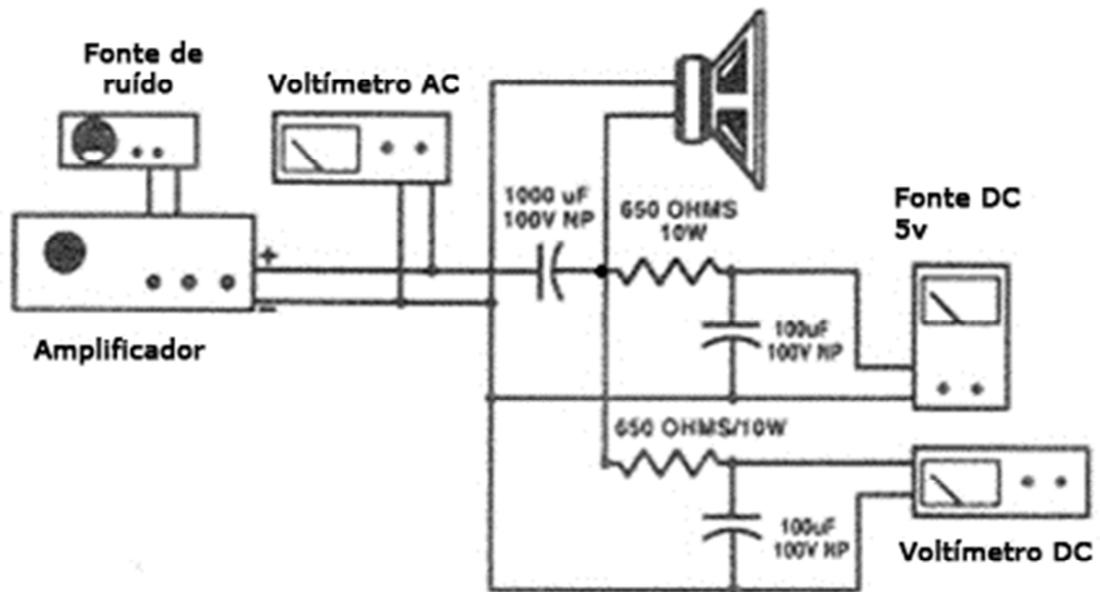


Figura 2.5 - Circuito utilizado para obtenção de parâmetros elétricos do alto falante em operação.

O capacitor em série no circuito tem a função de impedir que a corrente contínua(DC), fornecida pela fonte DC, não vá para a fonte de ruído. Já o capacitor em paralelo com a fonte contínua de 5V e o capacitor em paralelo ao voltímetro DC, têm a função de filtrar os sinais alternados gerados pela fonte de ruído. O voltímetro DC é conectado em paralelo com a bobina do alto falante, o que permite realizar a medição da queda de tensão provocada pela passagem da corrente contínua fornecida pela fonte DC.

Na Figura 2.6 pode ser observado a montagem realizada a partir do circuito proposto.

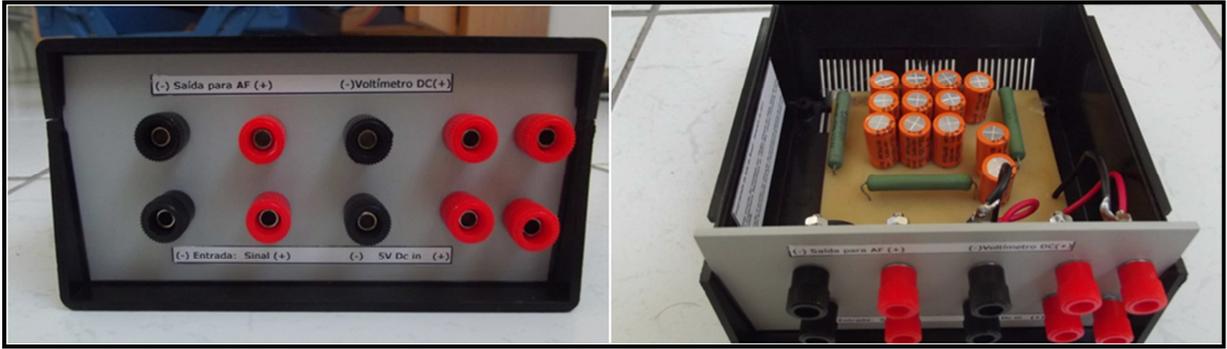


Figura 2.6 - Dispositivo montado

### 2.3.2. Procedimentos para estimar a temperatura na bobina

No primeiro momento, mede-se a resistência do alto falante fora de operação. Em seguida, o alto falante deve ser conectado ao dispositivo montado. Gerador de sinais desligado e multímetro também devem ser conectados ao dispositivo conforme ilustrado na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Sistema montado para realizar o teste

Ao ligar a fonte de 5V, como gerador de sinais desligado, foi verificado que ela estava fornecendo uma corrente de 8mA ao sistema montado. A tensão observada no multímetro foi de 35,3mV.

Utilizando a Equação (2) para o gerador de sinais o valor da resistência encontrado foi de 4,4125 *ohms*, diferente do medido para o alto falante desconectado do dispositivo. A diferença, 0,8125 *ohms*, é devida aos outros componentes do sistema montado e, em todos os cálculos da resistência da bobina, esse valor será subtraído do valor obtido pela equação (2).

O gerador de sinais foi configurado para enviar sinais de ruído na faixa de 4khz a 20khz. Essa faixa de frequência foi escolhida na tentativa de minimizar o efeito de “ventilação” criado pelo movimento da membrana do alto falante. Utilizando uma faixa de frequências menor em altas frequências, o deslocamento da membrana seria menor que se a faixa de frequências fosse maior.

Com o gerador ligado, a variação na tensão medida pelo multímetro foi observada, e quando não houve variação por um período de aproximadamente 30 minutos, foi considerado que o dispositivo estava em regime permanente no que diz respeito à transferência de calor.

#### 2.4. Modelagem do gap

O espaço entre a bobina e o restante do conjunto é de pequenas dimensões e é preenchido por ar. Ele foi modelado como três sólidos com propriedades parecidas com as do ar. As estruturas criadas podem ser vistas na Figura 2.8.

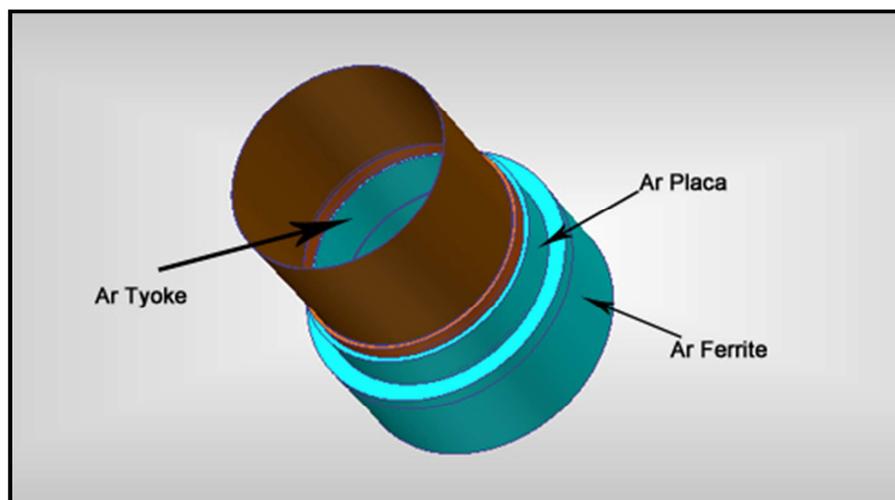


Figura 2.8 - Sólidos gerados para modelagem do gap

O ar que fica entre a bobina e o t-yoke foi nomeado Ar T-yoke. O ar que fica entre a bobina e o ferrite foi nomeado como Ar Ferrite e o ar que fica entre a bobina e a placa polar foi nomeado como Ar Placa. Para espaços pequenos entre superfícies, onde existe ar, o efeito da condução é predominante e o modelo pode ser simplificado, não levando em consideração a transferência de calor por convecção (AUTODESK, 2013).

## 2.5. Condições de contorno

As condições de contorno são valores iniciais de alguns parâmetros das equações e que permitem encontrar a solução. No estudo realizado, as condições de contorno foram a fonte de calor, temperatura ambiente, pontos de entrada e saída do ar que envolve o dispositivo.

A fonte de calor foi parametrizada utilizando a temperatura estimada da bobina aplicada na superfície da geometria que representa o enrolamento de cobre. Na Figura 2.9 pode ser observado o ponto de aplicação dessa condição de contorno.

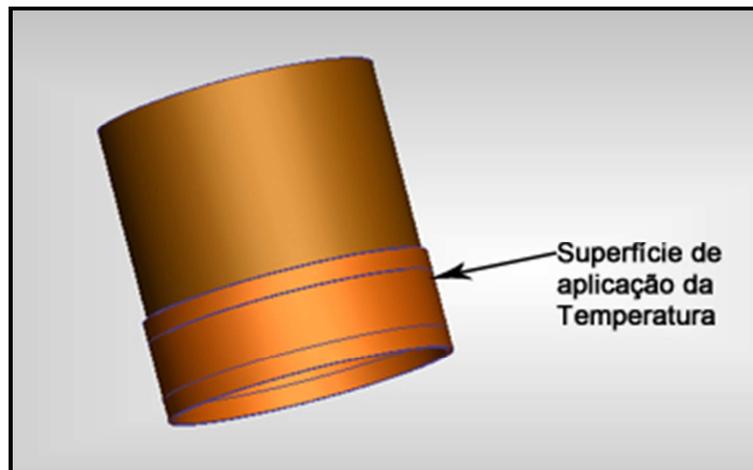


Figura 2.9 - Superfície de aplicação da temperatura da bobina

Outra condição de contorno que foi considerada foi baseada na condição de que um dispositivo imerso em um fluido, ar ou líquido, está sujeito à convecção externa. Com o aumento de sua temperatura, há a troca de calor com o ar ambiente.

Ao aquecer, a densidade do ar varia, levando ao movimento do fluido, o qual faz com que mais calor seja trocado entre o dispositivo e o ar.

O ar que envolvia o dispositivo foi modelado como uma caixa de dimensões parecidas com a configuração de “Chimney” (AUTODESK, 2013). Nessa configuração, o domínio de cálculo foi dimensionado de acordo com as configurações exemplificadas na Figura 2.10

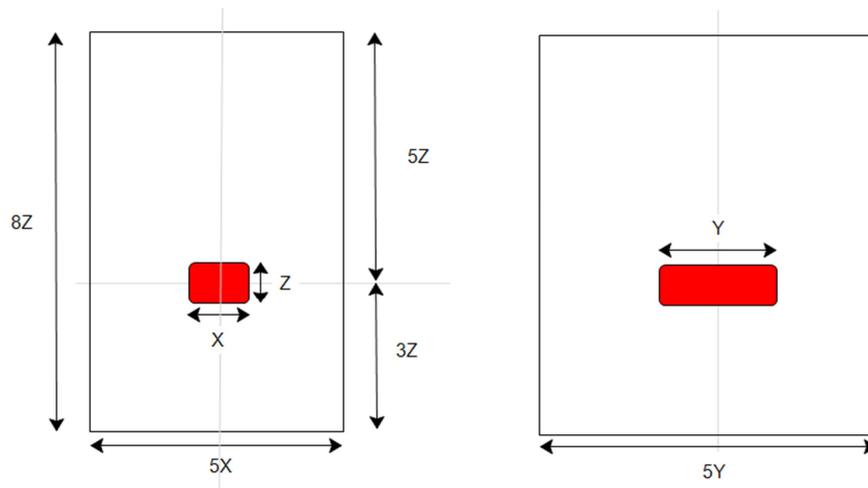


Figura 2.10 - Configuração de Chimney(AUTODESK,2013)

A caixa de ar modelada representava uma parte do ar ambiente da sala onde o dispositivo foi testado de maneira que, em relação ao restante da sala ela estava aberta. Para parametrizar essa situação foi aplicada pressão = 0 nas superfícies superior e inferior, o que indicava que essas faces estavam abertas sujeitas à entrada e saída de fluido, permitindo o movimento do ar, de acordo com a variação de sua densidade. Na superfície inferior, também foi aplicada uma temperatura estática para parametrizar a temperatura ambiente. Na Figura 2.11 pode ser vista a caixa modelada.

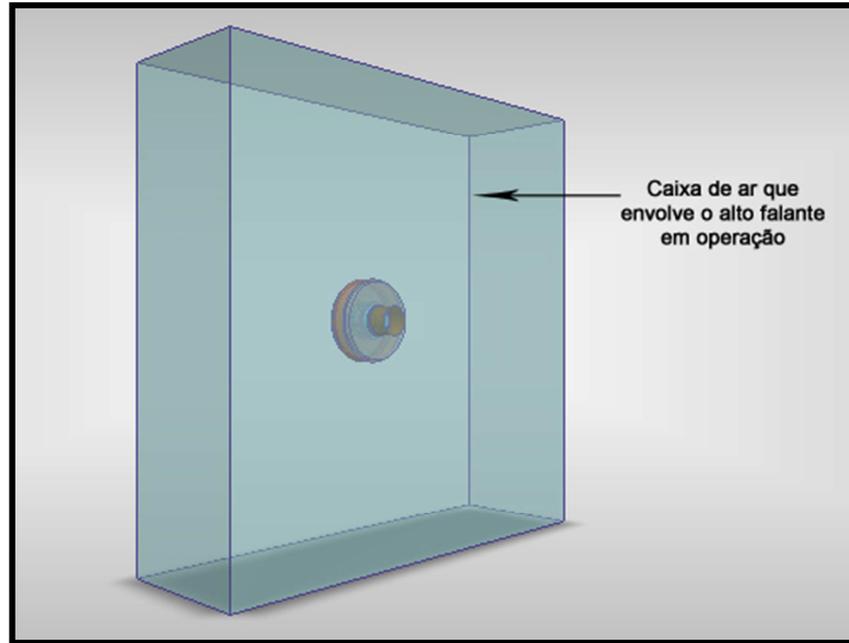


Figura 2.11 - Caixa de ar que envolve o alto falante

## 2.6. Obtenção dos parâmetros para simulação

Utilizando os conceitos como: Lei de Ohm; variação da resistência com a temperatura, definidos nas seções anteriores, para estimar a temperatura na bobina, foram realizados teste para três valores de tensão de ruído. Em cada teste, foram coletadas as informações necessárias para o cálculo da temperatura. Na Tabela 2.1 são apresentados os valores encontrados em cada teste.

Tabela 2.1 - Parâmetros Obtidos para parametrização do problema

Amplitude da tensão do gerador de sinais[V]	Alto falante fora de operação			Alto falante em operação		
	Vdc[mV]	Idc[mA]	R[Ohm]	Vdc[mV]	Idc[mA]	R[Ohm]
6,3	35,3	8	4,41	38	7,3	5,20
7,75	35,3	8	4,41	38,6	7,2	5,36
8,9	35,3	8	4,41	40,2	7	5,74

Como esperado, o alto falante em operação teve a resistência do enrolamento da bobina elevada, quando comparado com o alto falante fora de operação, devido ao aumento da temperatura causado pela perda na transformação da energia elétrica em energia acústica.

Na Tabela 2.2 são apresentados os valores da resistência depois de aplicado o fator de correção definido na seção 2.2.2.

Tabela 2.2 - Valores das resistências corrigidos

Tensão do Gerador de sinais [ $V_{ac}$ ]	Alto falante fora de operação	Alto falante em operação
	R [ $\Omega$ ]	R [ $\Omega$ ]
6,3	3,6	4,39
7,75	3,6	4,55
8,9	3,6	4,93

Na Tabela 2.3 são apresentados os valores para temperatura da bobina que foram encontrados utilizando a equação (21) para  $\alpha = 0,393$ .

Tabela 2.3 - Temperaturas estimadas

Amplitude da tensão do gerador de sinais [ $V$ ]	Temperatura estimada da bobina [ $^{\circ}C$ ]
6,3	81
7,75	88
8,9	119

Os valores de temperaturas obtidos mostram que o aumento da amplitude do sinal de entrada provoca uma elevação da temperatura na bobina. Esse é um comportamento esperado já que, com o aumento deste sinal, e conseqüentemente da potência entregue ao alto falante, há uma elevação na quantidade de energia dissipada em forma de calor.

Para que pudessem ser feitos ajustes de parâmetros da simulação, foram definidas algumas regiões que serviram de referência. A temperatura dessas regiões foi medida nos ensaios para que os valores pudessem ser comparados com os obtidos nas simulações. As áreas definidas podem ser vistas na Figura 2.12.

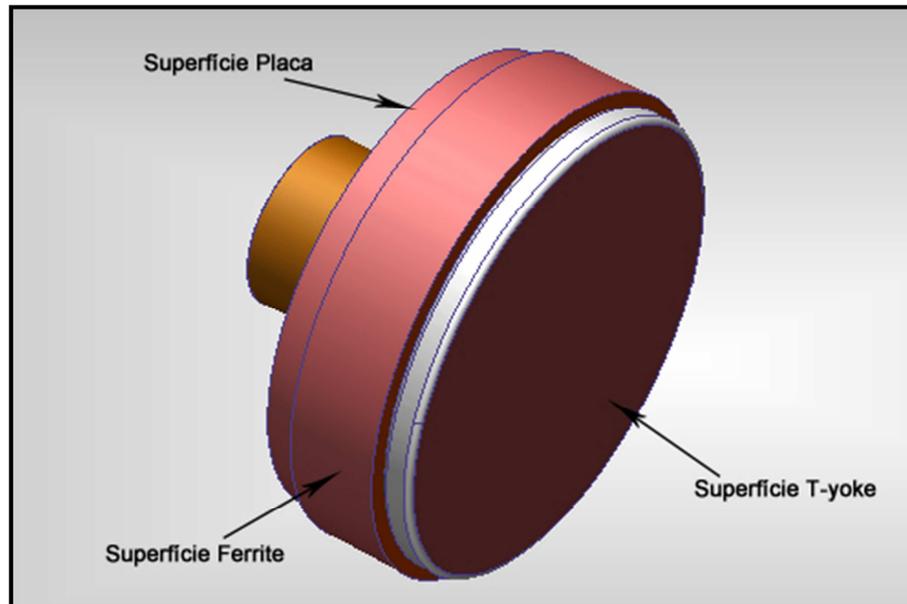


Figura 2.12 - Superfícies de referência para ajuste dos parâmetros

Com as condições de contorno especificadas no tópico 2.1.5 aplicadas, os parâmetros térmicos de Ar Placa, Ar T-yoke e Adesivo, foram ajustados até que as temperaturas nas superfícies de referência ficassem próximas às obtidas nos testes.

O ajuste foi realizado para três temperaturas estimadas da bobina: 81°C, 88°C e 119°C e os dados coletados das simulações podem ser observados na Tabela 2.4.

Pode ser observado que a condutividade térmica de Ar Placa e Ar T-yoke, aumentaram com a elevação da temperatura da bobina. Já a resistência térmica do adesivo, reduziu com o aumento da temperatura da bobina. Do conceito de condução térmica, o aumento da condutividade térmica acontece devido a diminuição na inércia das partículas dada a sua maior energia cinética por causa da temperatura mais elevada. Já a resistência térmica do adesivo diminui já que a inércia das partículas é menor.

Tabela 2.4 - Valores dos parâmetros obtidos após os ajustes

Temperatura na bobina - 81°C		
Resistência Térmica do Adesivo $\frac{W \text{ mm}^2}{K}$	1,40E+05	
	Ar Placa	Ar T-yoke
Temperatura [°C]	68,8	76,68
Condutividade Térmica $[\frac{W}{m K}]$	7,13e-5 a 60°C	1,14e-5 a 60°C
	7,48e-5 a 80°C	1,2e-5 a 80°C
Temperatura na bobina - 88,4°C		
Resistência Térmica do Adesivo $\frac{W \text{ mm}^2}{K}$	2,15E+04	
	Ar Placa	Ar T-yoke
Temperatura [°C]	76,73	82,82
Condutividade Térmica $[\frac{W}{m K}]$	1,15e-4 a 60°C	1,17e-4 a 80°C
	1,21e-4 a 80°C	1,23e-4 a 100°C
Temperatura na bobina - 119°C		
Resistência Térmica do Adesivo $\frac{W \text{ mm}^2}{K}$	7,00E+03	
	Ar Placa	Ar T-yoke
Temperatura [°C]	108,45	111,9
Condutividade Térmica $[\frac{W}{m K}]$	3,7e-4 a 100°C	1,6e-4 a 100°C
	3,94e-4 a 120°C	1,67e-4 a 120°C

De posse desses dados, o seguinte procedimento foi realizado para cada uma das temperaturas da bobina:

- Aproximação por uma reta das condutividades para o **Ar Placa**

Os dois pontos: 7,13e-5 a 60°C e 7,48e-5 a 80°C geraram a seguinte equação de reta:

$$0.0018E - 4. x + 0.6080E - 4. y = 0 \quad (22)$$

A temperatura de 68,8°C (temperatura média do sólido Ar placa), aplicada na equação, resultou em uma condutividade térmica de  $7,28E - 5 \frac{W}{m.K}$

- Aproximação por uma reta das condutividades para o **Ar T-yoke**

Os dois pontos: 1,14E-5 a 60°C e 1,2E-5 a 80°C geraram a seguinte equação de reta:

$$0.0018E - 4.x + 0.6080E - 4.y = 0 \quad (23)$$

A equação resultante aplicada na temperatura 76,68°C resultou em uma condutividade de  $7,42E - 5 \frac{W}{m.K}$

A igualdade da Equação (23) e (24) foi uma coincidência para o caso exemplificado.

O procedimento descrito anteriormente foi realizado também para as temperaturas de bobina 88 e 119°C e, os valores finais para condutividade térmica de Ar placa e Ar t-yoke estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Condutividade térmica de Ar Placa e Ar T-yoke

Temperatura da bobina [°C]	Ar Placa		Ar T-yoke	
	Temperatura do sólido [°C]	Condutividade Térmica $\left[\frac{W}{m.K}\right]$	Temperatura do sólido [°C]	Condutividade Térmica $\left[\frac{W}{m.K}\right]$
81	68,8	7,28E-05	76,68	7,42E-05
88	76,3	1,20E-04	82,82	1,178E-04
119	108,45	3,80E-04	111,9	1,65E-04

Os valores para condutividade térmica estão expressas especificamente para a temperatura do sólido calculada pelo software. Mais uma vez, é possível observar o aumento de tais valores com a elevação da temperatura.

Os valores da resistência do adesivo obtidos nas simulações foram utilizados para ajustar um polinômio de 3º grau, que é representado pela equação (24) e que foi utilizado para calcular a resistência térmica do adesivo dada uma temperatura estimada da bobina.

$$0.2450x^3 - 20.3165x^2 + 124.5450x = 0 \quad (24)$$

Para os demais sólidos, foram utilizadas as características térmicas dos materiais existentes no banco de dados do software. A Tabela 2.6 correlaciona os sólidos com seus respectivos materiais.

Tabela 2.6 - Materiais dos componentes da geometria

<b>Sólido</b>	<b>Material</b>
Placa polar	Aço
T-yoke	Aço
Ferrite	Ferrite
Enrolamento da bobina	Cobre
Reforço da bobina	Kraft

Cada material utilizado possui os parâmetros térmicos com valores pré-estabelecidos no software e foram esses os valores utilizados nas simulações.

### 3. VALIDAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO

A validação foi realizada para dois valores de sinal de ruído de entrada. As temperaturas da bobina foram estimadas utilizando a equação (21), para  $\alpha = 0,393$ . Na Tabela 3.1 podem ser vistos os valores de temperatura encontrados para cada valor de tensão de ruído aplicado.

Tabela 3.1 - Temperaturas Estimadas

<b>Amplitude da tensão do gerador de sinais[V]</b>	<b>Temperatura estimada da bobina[°C]</b>
8,4	107
7,1	86,7

O valor da resistência térmica do adesivo foi encontrado aplicando a temperatura estimada da bobina na equação (24)

Tabela 3.2 - Temperaturas Estimadas

<b>Amplitude da tensão do gerador de sinais [V]</b>	<b>Resistência térmica do adesivo <math>\left[\frac{W \text{ mm}^2}{K}\right]</math></b>
8,4	80871
7,1	17760

A condutividade térmica para Ar Placa e Ar T-yoke foi configurada de acordo com os valores da Tabela 2.5. As telas de configuração podem ser vistas na Figura 3.1 e na Figura 3.2. foram inseridos e foi utilizada uma aproximação polinomial de 3º grau.

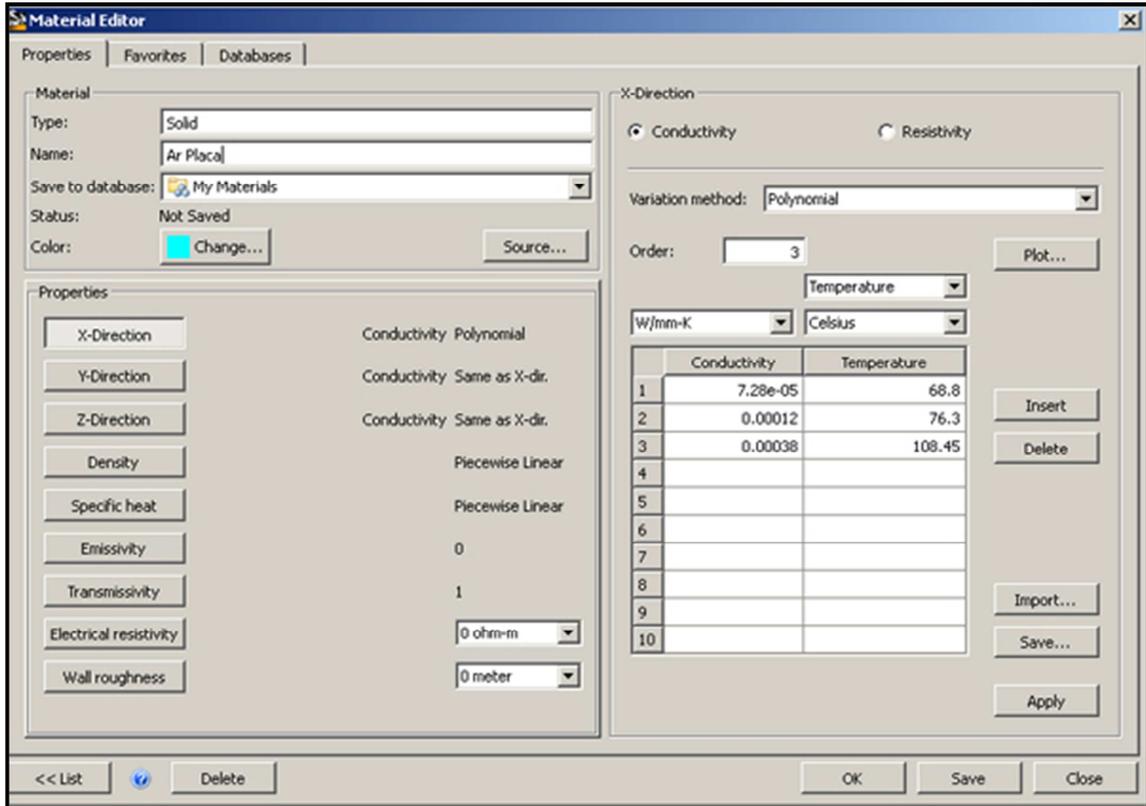


Figura 3.1 - Configuração da condutividade térmica do Ar Placa

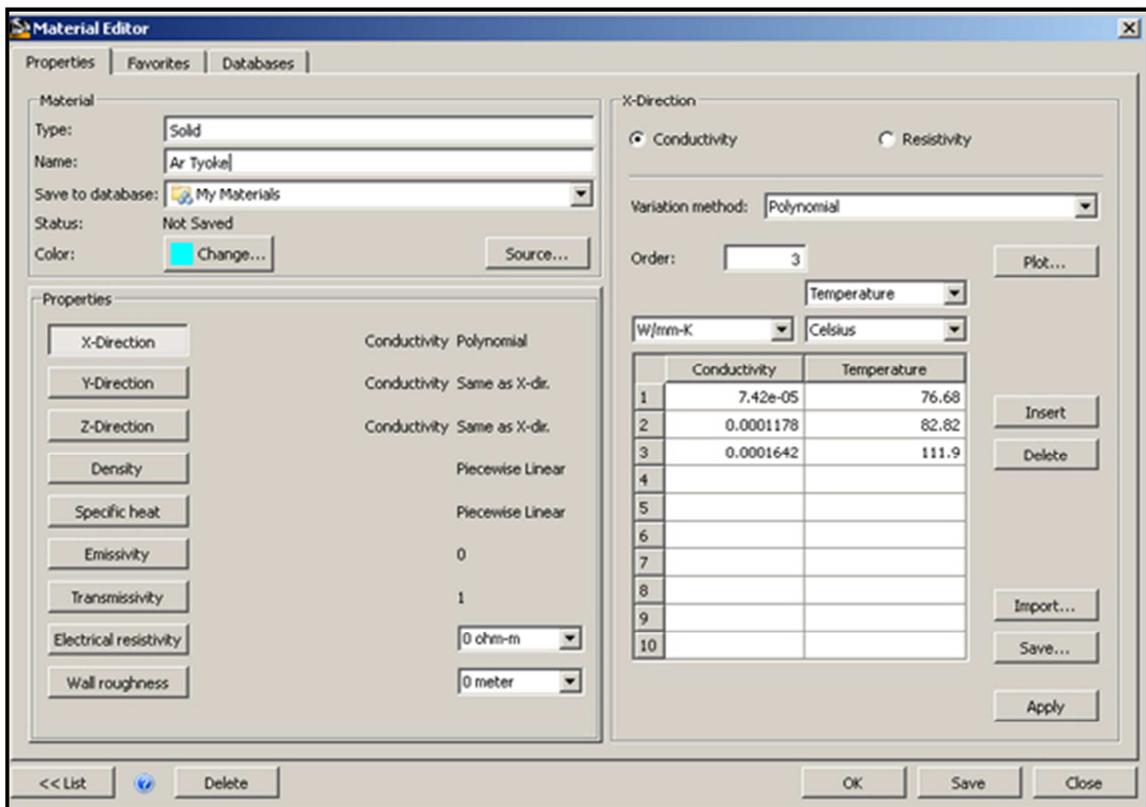


Figura 3.2 - Configuração da condutividade térmica do Ar T-yoke

A configuração da solução foi feita conforme pode ser visto na figura 3.3

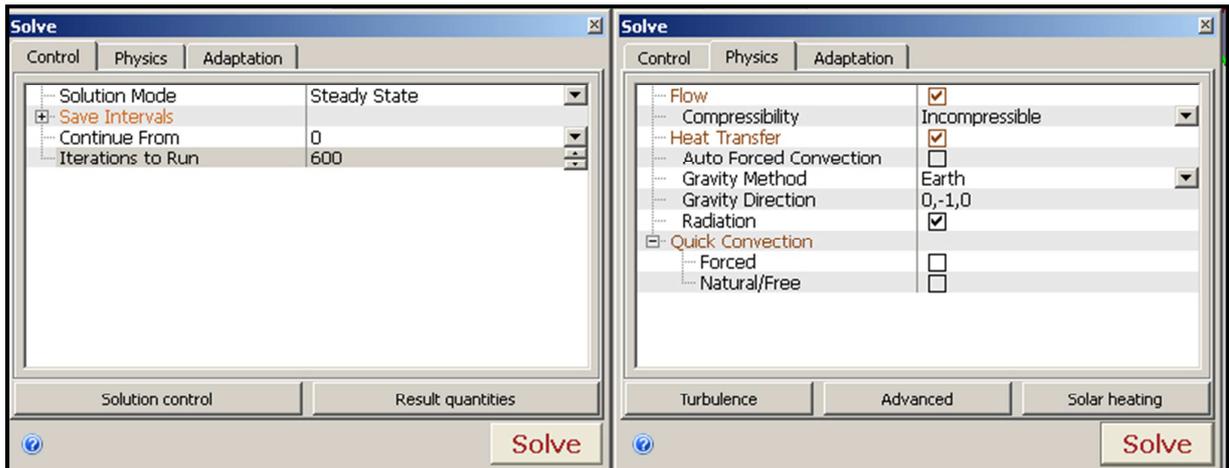


Figura 3.3 - Configuração da solução

A opção “Flow”, que significa fluxo foi habilitada para permitir a movimentação do ar que envolve o dispositivo devido ao efeito da convecção. O fluido a ser analisado foi considerado como sendo o caso ideal, ou seja, incompressível. A gravidade foi configurada de acordo com a geometria modelada, que no caso, foi configurada para o sentido negativo do eixo Y. O efeito da radiação foi habilitado. Para casos que existem pequenos espaços entre superfícies, a não consideração desse modo de transferência de calor pode resultar em temperaturas até 20% acima do real (AUTODESK, 2013).

Como condição inicial, foi configurado para que o software executasse 600 iterações. Essa informação é, na verdade, uma condição de parada caso a solução não convergir. A cada iteração o software verifica a convergência e, caso ela tenha sido alcançada, interrompe automaticamente os cálculos.

Na Figura 3.4 é apresentado o gráfico de convergência de uma simulação. No caso ilustrado, a simulação, mesmo tendo sido configurada para 600 iterações, foi concluída com 390 iterações.

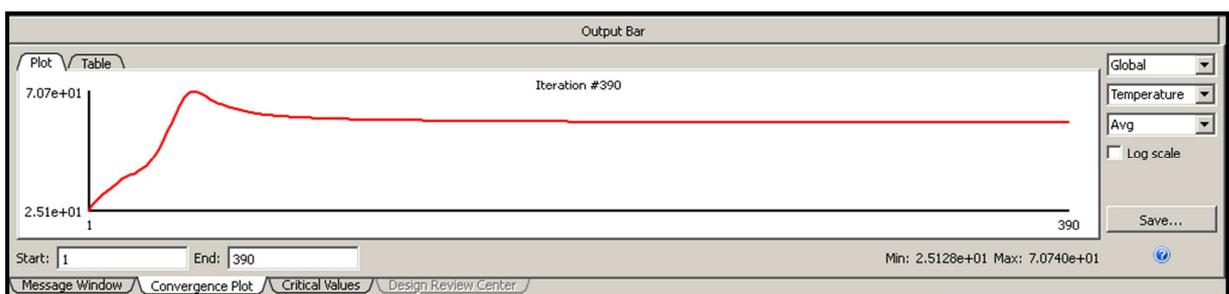


Figura 3.4 - Gráfico de convergência da simulação

A convergência da simulação tem significado importante, ela indica que a parametrização foi realizada de maneira correta já seu resultado converge para um valor.

### 3.1. Resultados das simulações

O resultado do gradiente de temperaturas pode ser visto na Figura 3.5. As temperaturas nas superfícies de referências foram calculadas para comparar com os valores obtidos nos testes reais. O resultado apresentado na figura foi obtido para a temperatura da bobina de 86,7°C. A Tabela 3.3 correlaciona o número da superfície apresentada pelo software e o componente que ele identifica.

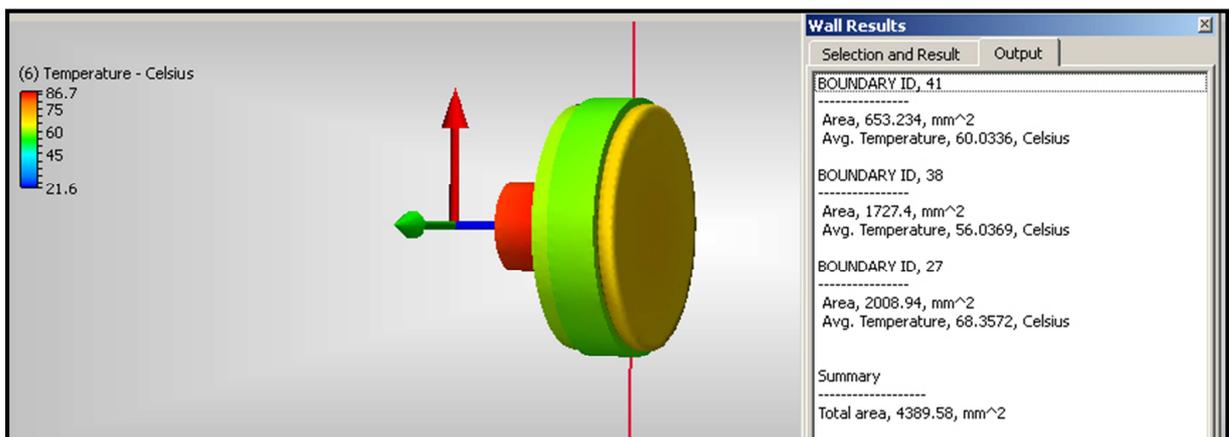


Figura 3.5 - Tela de obtenção das temperaturas das superfícies

Tabela 3.3 - Identificação da Superfície

Número da superfície	Componente
41	Placa
38	Ferrite
27	T-yoke

A vantagem da utilização da simulação em CFD para problemas nos quais o dispositivo aquecido está imerso em um fluido é a possibilidade de lidar com os efeitos da movimentação do fluido devido à alterações em sua temperatura. Essa possibilidade implica em resultados mais condizentes com a situação real já que o efeito desta movimentação é significativo na temperatura do dispositivo.

Na Figura 3.5 pode ser visto a movimentação para cima do ar aquecido nos arredores do circuito magnético do alto falante.

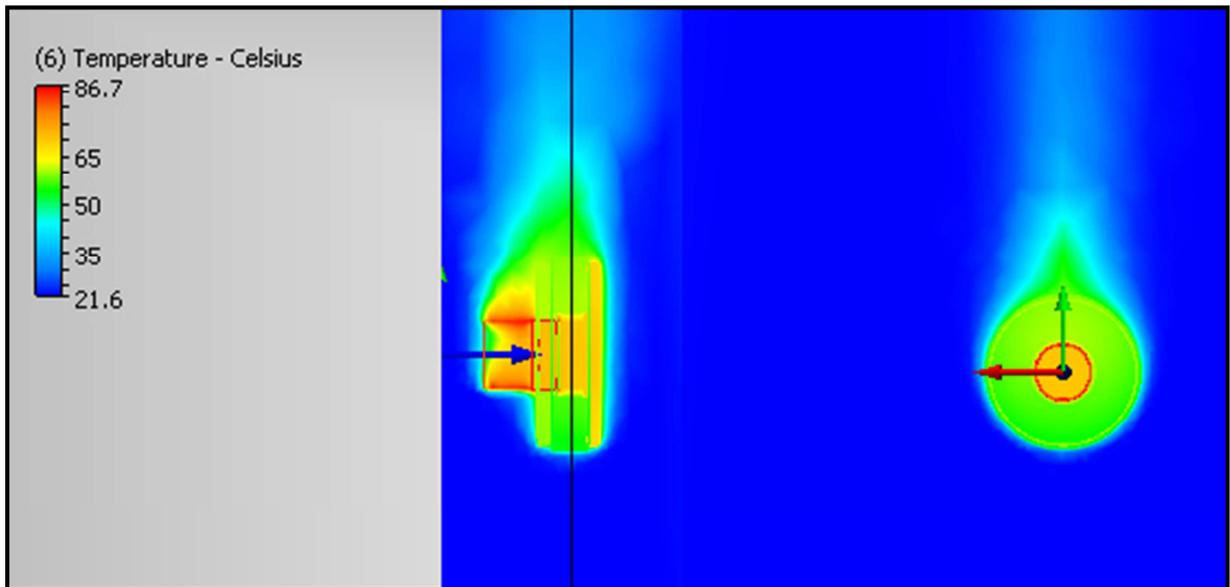


Figura 3.6 - Ar aquecido em movimento

O perfil de deslocamento de ar demonstra que, com o aumento da temperatura do ar nas proximidades do dispositivo, sua densidade fica menor que a densidade do daquele com menor temperatura. O ar com menor densidade, então, movimenta-se para cima.

Na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5 são apresentados os resultados das simulações realizadas para a validação da parametrização assim como o erro entre o valor simulado e o valor medido.

Tabela 3.4 - Resultados para temperatura da bobina de 86,7°C

Superfície	Temperaturas obtidas na simulação[°C]	Temperaturas medidas no ensaio[°C]	Erro
Placa	70,87	73,40	3,60%
Ferrite	56,26	59,40	5,28%
T-yoke	84,60	86,60	2,50%

Tabela 3.5 - Resultados para temperatura da bobina de 107,3°C

Superfície	Temperaturas obtidas na simulação[°C]	Temperaturas medidas no ensaio[°C]	Erro
Placa	60,03	57,80	3,80%
Ferrite	56,03	57,80	3,00%
T-yoke	68,36	72,20	5,31%

A geometria simulada é somente uma parte do conjunto, e, além disso, foram utilizadas as propriedades dos materiais padrões do software. Por esses motivos, um erro, mesmo que pequeno, já era esperado. Os valores encontrados mostram que mesmo com as simplificações e hipóteses adotadas, a simulação fornece valores próximos aos medidos. Comparando os resultados obtidos das duas simulações, pode ser observado que a dinâmica de variação da temperatura foi próxima ao observado nos testes reais.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo de criar uma metodologia para realizar simulação térmica de um alto falante foi alcançado. Isso foi proporcionado pelo alcance dos objetivos específicos, que permitiram a obtenção de informações e a realização das simulações para validar a metodologia.

A montagem do circuito para estimar a temperatura da bobina foi fundamental para parametrizar a simulação e ele poderá ser útil em trabalhos futuros que necessitem deste parâmetro.

As simplificações realizadas na geometria e a parametrização proposta foram adequadas, o que pode ser constatado na validação dos resultados, onde observou-se que a simulação aproxima-se ao que acontece na realidade.

Os conceitos de fenômenos de transferência de calor e a familiarização com os conceitos de CFD permitiram que a parametrização fosse feita de forma que as simulações gerassem resultados coerentes com o que acontece no teste real

A escolha do software determinou que a realização das simulações fosse possível em tempo hábil. Isso porque, o fato do software realizar os cálculos em uma máquina remota, dedicada a essa função, elimina o problema da deficiência no hardware para realizar os cálculos com rapidez. Em alguns casos, a necessidade de capacidade de processamento e memória RAM são tão altos, que é provável que a simulação não rode.

Os resultados obtidos das simulações indicam que a metodologia proposta pode fornecer informações para auxiliar no projeto e otimização de alto falantes com objetivo de melhorar a dissipação de calor para aumentar sua potência nominal. Levando em consideração as simplificações realizadas e as hipóteses assumidas, as diferenças apresentadas entre os resultados das simulações e os dados coletados dos testes foram relativamente pequenas. O estudo pode ser melhorado com algumas ações, por exemplo, levantamento das características térmicas específicas dos componentes analisados, melhorar o sistema de medição da temperatura dos componentes.

#### **4.1. Sugestão para trabalhos futuros**

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, novos estudos podem ser realizados visando aperfeiçoar a metodologia apresentada para simular as transferências de calor no alto falante. Algumas sugestões para estudo:

- Obtenção das características térmicas reais dos materiais utilizados.
- Realizar simulação para estrutura completa do alto falante.
- Variar a geometria do circuito magnético para dissipar melhor o calor.
- Identificar possíveis materiais substitutos para os materiais utilizados.
- Modelagem da ventilação do circuito magnético provocada pelo movimento da membrana.

## REFERÊNCIAS

AUTODESK.<[http://wikihelp.autodesk.com/Simulation\\_CFD/enu/2013/](http://wikihelp.autodesk.com/Simulation_CFD/enu/2013/)>. Acesso em: 20 mar. 2013.

BEHLER, Gottfried K.; Bernhard, Armin. **Measuring Methods to Derive the Lumped Elements of the Loudspeaker Thermal Equivalent Circuit**. 104a AES Convention, maio 1998

BUTTON, Douglas J., **Heat Dissipation and Power Compression in Loudspeakers**. J. Audio Eng. Soc, Northridge, USA, v. 40, n. ½, p. 32-41; fev. 1992

DICKASON, Vance. **The Loudspeaker Design, Cookbook Audio Amateur Press, New Hampshire, USA, p.170-171, out. 2000.**

DODD, Mark. **The Application of FEM to the analysis of loudspeaker motor Thermal Behavior**. 112a AES Convention, maio 2002

HERICKSEN, Clifford A. **Heat Transfer Mechanisms in Loudspeaker**. J. Audio Eng. Soc. , Michigan USA, v. 35, p.778-791, out. 1987.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 3a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 1990.

KREITMEIER, Leonhard. **FEM simulation of Loudspeakers and loudspeakers components**. 20<sup>th</sup> CAD-FEM Users Meeting , International Congress on FEM Technology, 2002

LEWIS, Roland W.; NITHIARASU, Perumal; SEETHAMARU, Kankanhalli N..**Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow**. Chinchester: Wiley, 2004.

LUNARDI, B. **A Study of Speakers and their Harmonics**. Urbana, 2004

MALISKA, Clovis R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2a edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004.

NILSSON, James W.; RIEDEL Susan A. **Circuitos Elétricos**. 8a edição. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2009

TSILI, Marina **A Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model.** International Journal of Thermal Science. dez. 2010.