

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

ALLAN DI CUNTO D'ÁVILA DE ALMEIDA

Avaliação do Ciclo de Vida Comparativa : Transdutores Acústicos de NdFeB e Ferrite

São João da Boa Vista

2019

Allan Di Cunto D'Ávila de Almeida

Avaliação do Ciclo de Vida Comparativa : Transdutores Acústicos de NdFeB e Ferrite

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Profº Dr. José Augusto de Oliveira

São João da Boa Vista

2019

Almeida, Allan Di Cunto D'Ávila de

Avaliação do ciclo de vida comparativa: transdutores acústicos de NdFeB e Ferrite / Allan Di Cunto D'Ávila de Almeida -- São João da Boa Vista, 2019.
59 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Câmpus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Bibliografia

1. Alto-falantes 2. Bobinas 3. Ferro-ferrita 4. Neodímio 5. Sistema de gestão ambiental 6. Telecomunicações

CDD 23. ed. – 621.382

Ficha catalográfica elaborada pela [Biblioteca-BJB](#)

Bibliotecário responsável: João Pedro Alves Cardoso – CRB-8/9717

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMPARATIVA DE TRANSDUTORES
ACÚSTICOS DE NdFeB E FERRITE

Aluno: Allan Di Cunto D'Ávila de Almeida

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Banca Examinadora:

- José Augusto de Oliveira (Orientador)
- Mirian Paula dos Santos (Examinador)
- Letícia Barbosa Fidanza (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 36/2018)

São João da Boa Vista, 04 de dezembro de 2019

A minha família e ao meu avô e escritor Armindo de Almeida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a instituição pela oportunidade e suporte para a minha formação, ao meu orientador Profº Dr. José Augusto de Oliveira que sempre me forneceu assistência, aos meus amigos, Guilherme Pupin Conacci, Jéssica de Oliveira Gonçalves, João Lucas Menicuci, Larissa Roberta Andrade, Letícia Barbosa Fidanza, Melissa de Oliveira Santos, Tharik Ramos e toda a turma 013 que nunca deixaram de me ajudar e fizeram parte desta jornada. Agradeço principalmente aos meus pais, meu irmão e a minha namorada Débora Beatriz Claro Zanitti, por terem acreditado no meu potencial e sempre me incentivaram a nunca desistir, sem eles não teria chego até aqui.

“...the scientific student ought not to be as the ant, who gathers merely, nor as the spider who spins from her own bowels, but rather as the bee who both gathers and produces.”
(Michael Faraday)

RESUMO

O entendimento da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na área de alto-falante busca ajudar no desenvolvimento de novos produtos e encontrar soluções mais eficientes, aumentando assim o conhecimento na área desde a extração da matéria prima até a manufatura. Desta forma o estudo, foi limitado a uma ACV comparativa entre materiais de modelos distintos de alto-falante, e, com o auxílio do banco de dados presente nos softwares GaBi e OpenLCA a fim de recriar o cenário de extração e manufatura. Estes cenários foram abordados separadamente visando compreender cada vez mais desde a parte material quanto técnica segmentando em componentes o sistema do ciclo de vida do alto-falante. Assim delimitou-se para a bobina do alto-falante, componente essencial do funcionamento de um alto-falante e diretamente ligado à sua eficiência e durabilidade visto os materiais. Ao fim, verificou-se as metodologias disponíveis e aplicáveis para a linha de produção de bobinas, visto como principal enfoque do estudo. Os processos de manufatura e a análise dos resultados mostra que os dados de entrada necessários para a avaliação ambiental é diretamente proporcional ao grau de assertividade, e, ressaltando que os materiais presentes na produção provém de elementos básicos a elementos raros encontrados na terra tornando essencial o entendimento total da linha de produção para uma coleta eficaz dos dados para serem usados atribuídos a Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do Ciclo de Vida. Alto-falante. Neodímio. Ferrite. Bobina.

ABSTRACT

Understanding the application of Life Cycle Assessment (LCA) in the speaker area seeks to assist in the development of new products and find more efficient solutions, thereby increasing knowledge in the field from raw material extraction to manufacturing. Thus, the study was limited to a comparative LCA between materials of different speaker models, and, with help of the database present in GaBi and OpenLCA software in order to recreate the extraction and manufacturing scenario. These scenarios were approached separately in order to increasingly understand from the material to the technical part segmenting the speaker lifecycle system into components. Finally, we verified the available and applicable methodologies for the coil production line, seen as the main focus of the study. The manufacturing processes and the analysis of the results show that the input data required for the environmental assessment is directly proportional to the degree of assertiveness, and, emphasizing that the materials present in the production come from basic elements to rare elements found in the earth making the full understanding of the production line for effective data collection to be used for Life Cycle Inventory Analysis (LCI).

KEYWORDS: Life Cycle Assessment. Loudspeaker. Neodymium. Ferrite. Voice Coil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Teoria da evolução exponencial ao longo dos anos.	14
Figura 2	Diagrama do ciclo básico da produção e reciclagem do minério Nd e ferrite.	18
Figura 3	Modelo de estrutura para Avaliação do Ciclo de Vida.	18
Figura 4	Representação da resposta em frequência de um sistema de alto-falante de duas vias da década de 70.	20
Figura 5	Modelo de três vias JBL L100.	22
Figura 6	Modelo representativo de um alto-falante de ferrite.	23
Figura 7	Mapa representativo de componentes e materiais de um alto-falante.	25
Figura 8	Modelo conceitual cíclico das fases de lançamento e análise de um produto.	26
Figura 9	Modelo de fases do ciclo de vida e suas fronteiras.	31
Figura 10	Diagrama geral das etapas de produção de um alto-falante.	32
Figura 11	Vista em três dimensões ressaltando as componentes da pesquisa.	33
Figura 12	Vista lateral do conjunto magnético do modelo de alto desempenho (esquerda) e de baixo desempenho (direita).	33
Figura 13	Plote comparativo dos resultados do ímã em percentil.	39
Figura 14	Plote comparativo dos resultados da bobina em percentil.	40
Figura 15	Plote comparativo da categoria GWP dos processos das bobinas em percentil.	41
Figura 16	Plote comparativo dos resultados da fôrma da bobina em percentil.	42
Figura 17	Diagrama de falha de alto-falante	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normas ISO – Avaliação do Ciclo de Vida.	28
Tabela 2 – Modelo e material dos alto-falantes.	30
Tabela 3 – Método analítico para comparação e validação dos valores de massa.	34
Tabela 4 – Principais categorias e indicadores.	36
Tabela 5 – Tabela de resultados dos materiais da produção do ímã.	38
Tabela 6 – Tabela de resultados dos materiais da produção da bobina.	40
Tabela 7 – Tabela de resultados dos materiais da produção da fôrma da bobina.	42
Tabela 8 – Inventário da bobina de alumínio.	48
Tabela 9 – Inventário da bobina de cobre.	49
Tabela 10 – Inventário da fôrma de alumínio.	50
Tabela 11 – Inventário da fôrma de fibra de vidro.	51
Tabela 12 – Resultados CML 2001 das bobinas.	52
Tabela 13 – Resultados Environmental Footprint 2.0 das bobinas.	52
Tabela 14 – Resultados ReCiPe 2019 v1.1 das bobinas.	53
Tabela 15 – Resultados TRACI 2.1 das bobinas.	53
Tabela 16 – Resultados CML 2001 das fôrmas.	53
Tabela 17 – Resultados Environmental Footprint 2.0 das fôrmas.	54
Tabela 18 – Resultados ReCiPe 2019 v1.1 das fôrmas.	54
Tabela 19 – Resultados TRACI 2.1 das fôrmas.	54
Tabela 20 – Datasheet parcial do modelo JBL2216Nd.	55
Tabela 21 – Datasheet parcial do modelo JBL15CV5.	56
Tabela 22 – Catálogo de alto-falante e materiais do modelo JBL15CV5.	57
Tabela 23 – Densidade dos materiais.	58
Tabela 24 – Resultados TRACI 2.1 dos ímãs.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNESP	Universidade Estadual Paulista
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RoHs	Restrições de Certas Substâncias Perigosas (Restriction of Certain Hazardous Substances)
WCED	Comissão Mundial sobre Meio ambiente e Desenvolvimento (World Commission on Environment and Development)
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
ISO	Organização Internacional de Normalização
PDP	Planejamento e Desenvolvimento do Produto
Nd	Neodímio
O ₃	Ozônio
Sr	Estrôncio
Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico
GWP	Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential)
Sn	Estanho
Al	Alumínio
Cu	Cobre
Pb	Chumbo
N	Nitrogênio
P	Fósforo
As	Arsênio

SO ₂	Dióxido de Enxofre
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NH ₃	Amônia
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
HNO ₃	Ácido Nítrico
Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	Colemanita
CaMg(CO ₃) ₂	Dolomita
IR	Infravermelho
ADP	Depleção de Recursos Abióticos (Abiotic Depletion Potential)
EoL	Fim de Vida (End of Life)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Iniciais	14
1.2	Objetivos	16
1.3	Justificativas	16
1.4	Revisão Bibliográfica	17
1.5	Estrutura do Trabalho	19
2	CARACTERIZAÇÃO GERAL DE ALTO-FALANTE	20
2.1	Aspectos teóricos	20
2.2	Processo de Manufatura e Materiais	22
3	GESTÃO AMBIENTAL	26
3.1	Modelo adotado	26
3.2	Normas ISO	28
4	MÉTODO DE PESQUISA	29
4.1	Objetivo e Escopo ISO 14040	29
4.2	Análise do Inventário do Ciclo de Vida	30
4.2.1	Descrição geral do ICV	30
4.3	Aquisição de matéria prima	31
4.4	Processos e Componentes	31
4.5	Avaliação de impacto do ciclo de vida	35
4.6	Definição da categoria de impacto	36
4.7	Resultados das componentes do alto-falante	38
4.7.1	Produção do Ímã	38
4.7.2	Produção da bobina	39
4.7.3	Produção da fôrma da bobina	42
4.8	Cenários abordados	43
4.8.1	Reparo para alto-falante	43
4.8.2	Modularidade da impedância	43
4.8.3	Conscientização de reciclagem de materiais em alto-falantes	44
5	CONCLUSÕES	45
6	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICE A – INVENTÁRIO DOS MATERIAIS	48

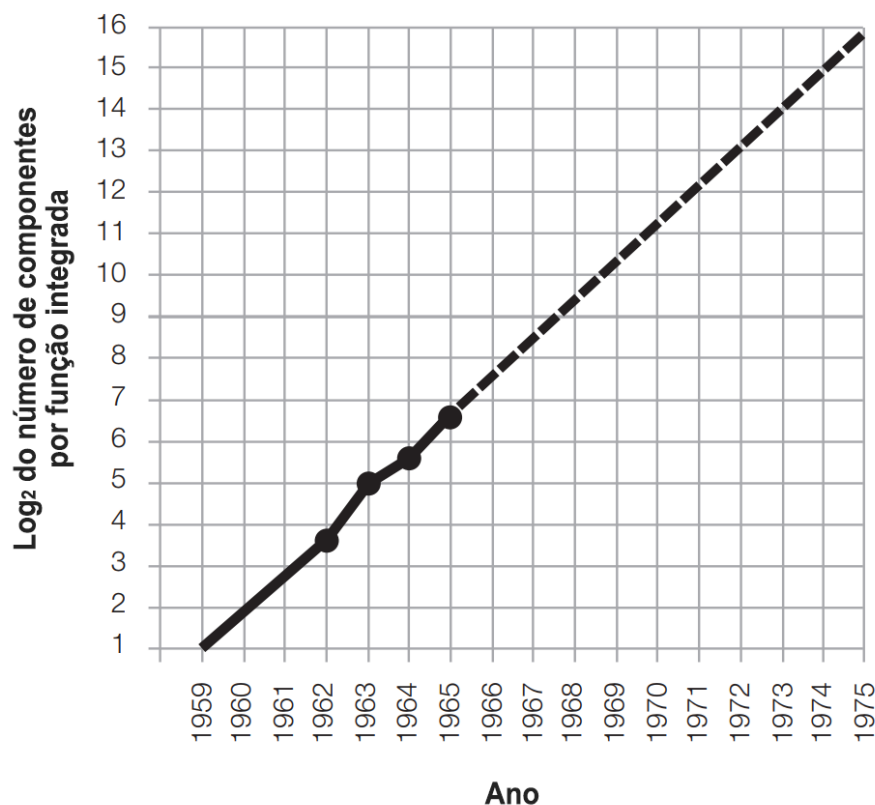
APÊNDICE B – RESULTADOS METODOLÓGICOS DAS BOBINAS . . .	52
ANEXO A – DATASHEET DO ALTO-FALANTE JBL2216ND E JBL15CV5	55
ANEXO B – DENSIDADE E MATERIAIS DOS ALTO-FALANTES	57
ANEXO C – RESULTADOS METODOLÓGICOS DOS ÍMÃS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Produtos eletrônicos se tornaram onipresentes no mundo moderno e embora seja apenas um século que separa nosso cotidiano de um mundo sem tais dispositivos, é difícil imaginar casas, locais de trabalho existindo sem qualquer forma familiar de eletrônica. Mesmo este trabalho de conclusão de curso não poderia ter sido possível em sua forma atual realizado sem a presença de uma rede complexa de milhares de eletrônicos para auxiliar na coleta de informações, cálculos, composição e modelagem necessários para realizar esta tarefa com maior fidelidade, aprofundamento, velocidade e precisão. Este mundo da eletrônica, embora relativamente novo, não se desenvolveu completamente e em meados de 1965 não se tinha precisão real sobre o futuro da eletrônica, mas, Gordon E. Moore, conhecido pela Lei de Moore que descreve a teoria da evolução exponencial do desempenho dos transistores, já previu e afirmou que aproximadamente a cada dois anos a quantidade de transistores teria um aumento de 100% como podemos ver na **Figura 1** mantendo o mesmo ou menor custo e o mesmo espaço físico [12].

Figura 1 – Teoria da evolução exponencial ao longo dos anos.



fonte: (Adaptado de Claeys, C., 2009)

Se torna importante o entendimento da grandeza desse salto que se dá a cada ano, pois esta, dita o quanto podemos evoluir e até onde chegaremos. A eletrônica vem se adentrando em todas as áreas e está presente na maioria das etapas de uma linha de produção, sendo um fator que pode ser benéfico em termos econômicos e negativos em questões ambientais, dado o modelo adotado de exploração e implementação nos sistemas existentes para se tornar cada vez mais barata. A modernização introduz inúmeras mudanças até mesmo nos sistemas sociais estabelecidos, e muita atenção tem sido direcionada para identificar essas mudanças e focalizá-las em benefício da sociedade. Mas, infelizmente as mudanças e impactos negativos introduzidos pelo descarte de lixo eletrônico e fornecimento de materiais para novos eletrônicos foram muitas vezes amplamente ignorados. Essas ações representam fluxos de materiais potencialmente prejudiciais porém valiosos. Se interligados por uma cadeia de recuperação e reciclagem podem produzir fluxos de materiais sustentáveis e menos agressivos.

O principal objetivo de toda organização é satisfazer as necessidades implícitas do cliente e assim há necessidade de reestruturação do produto, a fim de sustentar e moldar a relação existente entre o fabricante e usuário final. A sustentabilidade é o equilíbrio ou a integração de questões ambientais, sociais e econômicas que a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED - *World Commission on Environment and Development*) de 1987 definiu como o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades [20].

A responsabilidade pelo gerenciamento de resíduos passou a ser compartilhada entre os geradores e o poder público, bem como os fabricantes, distribuidores e importadores de produtos que produzem resíduos com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) Lei nº 12.305/10. Juntamente com o conceito do acordo setorial como o ato de natureza contratual firmado entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes, tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto. Para isso, se reúnem e discutem as ações cabíveis para que ocorra da melhor forma possível, sendo viável técnica e financeiramente, de modo que o resíduo descartado retorne ao fabricante.

Na legislação Europeia temos a Restrição de Certas Substâncias Perigosas (RoHs - *Restriction of Certain Hazardous Substances*) que restringe o uso de algumas substâncias em processos de fabricação de produtos. Inicialmente, a RoHs só se aplicava a União Europeia, mas com a globalização, rapidamente se tornou uma norma nos mercados internacionais. Outros países também estabeleceram diretrizes parecidas com a RoHs. Os fabricantes encontraram uma grande dificuldade em seguir esta lei. A solda por exemplo, tradicional, usada para fixar os dispositivos em placa de circuito é composta basicamente por estanho (Sn) e chumbo (Pb). Dessa maneira os fabricantes tiveram que usar outras alternativas neste processo.

Outra diretiva é a de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), que impõe obrigações às organizações contendo as regras aplicáveis aos resíduos eletrônicos na Comunidade Europeia. Esta diretiva incentiva e define critérios específicos para a coleta, manuseio e reciclagem de resíduos elétricos e eletrônicos. Também estabelece requisitos para a quantidade de coleta de REEE, responsabiliza os revendedores pelo fornecimento de devoluções REEE de forma gratuita e exige que

os REEE coletados sejam tratados [20].

Desta maneira, destaca-se a importância de se realizar estudos de ACV que é uma técnica de avaliação do impacto ambiental e à saúde associado a um produto ou processo. Tal técnico compreende etapas, que, vão desde a retirada de matéria-prima elementares da natureza, que entram no sistema produtivo, até a disposição do produto final pós uso (*Cradle-To-Grave*).

O número limitado de ACVs para alto-falantes também é devido à falta de financiamento de estudos em relação ao ciclo de vida nesse setor industrial. Nesse contexto pouco tem sido feito para melhorar a qualidade dos dados nos processos produtivos, denotando que alguns fatores de relevante impacto ambiental são raramente levados em consideração.

Os impactos ambientais associados à produção de um alto-falante serão avaliados através de um estudo de caso, utilizando a metodologia de ACV baseado na norma ISO 14040:2016. A metodologia inclui quatro etapas: a definição de escopo, a Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e interpretação dos resultados [1].

1.2 OBJETIVOS

Realizar um estudo comparativo entre modelos de alto-falantes com a finalidade de avaliar criticamente os fatores relevantes de desempenho e ambiental. Por meio de *software*, quantificar e modelar as etapas de produção desde a extração da matéria prima até a manufatura. Estudar e compreender todas as etapas em questão, a motivação da escolha de cada material que compõe um alto-falante, os conceitos, os cenários e os procedimentos necessários para concluir e interpretar todas as etapas da ACV buscando novas técnicas e soluções.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Devido o potencial da ACV em contribuir para minimização dos impactos ambientais de um produto, esta ferramenta da origem da Engenharia Ambiental pode ter importante participação no desenvolvimento na área de Engenharia de Telecomunicações. Outra grande área da Engenharia, o Planejamento e Desenvolvimento do Produto (PDP), pode receber uma importante contribuição com a ACV, principalmente no projeto do produto, atribuindo a este, características que não oferecem riscos ao meio ambiente e a seus usuários, e que atendam aos princípios de sustentabilidade e às normas ambientais. A ACV também interfere na Engenharia do Produto, propondo a utilização de materiais menos agressivos ao meio ambiente, e o uso racional e otimizado de energia e matérias-primas. Além disso, com base nos resultados da ACV, podem-se propor estratégias no desenvolvimento de produtos com a finalidade de prolongar sua vida útil, facilitar sua desmontagem para o aproveitamento de seus componentes e possibilitar a reciclagem de seus materiais. É possível também modelar o produto, tornando modular visando a recuperação de partes para serem empregadas em outros produtos, eliminando a necessidade de fabricar essas partes novamente, reduzindo assim, a utilização de matéria-prima e a geração de resíduos [6,11].

Na Gestão de Operações, a ACV pode contribuir para definir a escolha dos recursos de produção, além da forma como as atividades relacionadas à fabricação do produto ou a prestação dos serviços

serão integradas. Com base nos resultados da ACV, elabora-se de forma mais eficiente o planejamento da utilização dos recursos, das necessidades de materiais, o desenvolvimento de produtos e o controle da produção. Não somente os produtos podem ser modificados a partir das conclusões da ACV, mas também seus processos de produção e caso seja constatado que um processo não está sendo realizado de uma forma sustentável, ou seja, está demandando mais materiais e energia que o necessário, ou que está gerando resíduos em excesso, esse deve ser objeto de estudos e melhorias [17]. A Logística de distribuição do produto e de suas matérias-primas também é alvo da ACV. Os impactos causados pelo tipo de transporte utilizado e pela forma como ocorre a movimentação de materiais também podem ser avaliados pela ACV. É considerada a logística reversa, que consiste no recolhimento pela indústria dos produtos descartados ou defeituosos para que sejam reaproveitados ou para que seja dada uma destinação adequada, no caso de não ser possível seu reaproveitamento.

A adequação às leis ambientais não é somente uma questão de obrigatoriedade, é também uma questão estratégica. A imagem de uma organização está atrelada à forma como esta lida com os aspectos ambientais de seus produtos, serviços e processos. Tanto do ponto de vista da sociedade como do meio empresarial, uma organização deve possuir boa reputação não só para consolidar sua imagem, mas também para aproveitar oportunidades de negócios, já que muitas empresas exigem que seus parceiros possuam certificações que comprovem sua adequação às normas ambientais [6,16]. A ACV dos produtos permite encontrar fontes alternativas de matéria-prima e energia para tais produtos, desenvolver processos que necessitam de menos insumos e que gerem menos resíduos, identificar a possibilidade de reutilizar subprodutos ou partes do produto acabado além de], dar um destino adequado ao produto após seu descarte pelo consumidor.

O interesse por esse tema surgiu ao longo da disciplina Ciências do Ambiente do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, através da qual foi possível adquirir o conhecimento que serviu como um dos pilares base para o desenvolvimento deste trabalho.

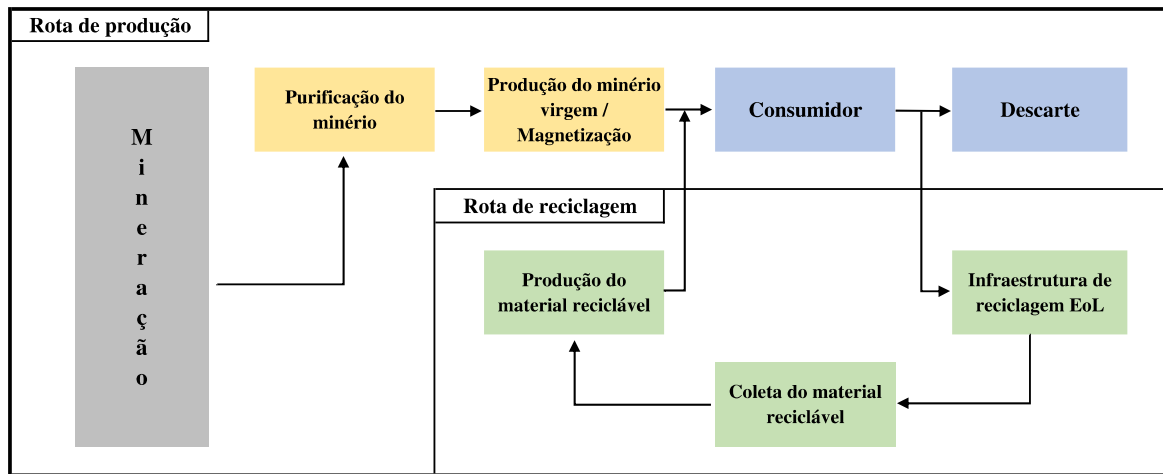
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos materiais que usamos não fazem mais parte do metabolismo natural da Terra e os volumes que precisamos estão se aproximando dos limites, a eletrônica e os fluxos de materiais que eles representam são uma das mais recentes adições a esse fenômeno. Embora existam muitos fluxos de materiais presentes na indústria eletrônica, uma porção considerável desses componentes eletrônicos são dispositivos de áudio que contêm o elemento Neodímio (Nd) de terras raras por exemplo [23]. A análise desse fluxo de material específico revela a extensão desses fluxos eletrônicos, os impactos pelos quais eles são responsáveis e os tipos de oportunidades de mudança positiva que eles representam.

À primeira vista, a fabricação de alto-falantes é segmentada em dois grandes vieses, os produzidos com Nd e os com ferrite que vem sendo um material amplamente utilizado por décadas desde os primeiros modelos de alto-falante e será utilizado como comparativo na etapa análise de resultados da ACV [20]. A escolha desse material para ser implementado em um alto-falante requer grande estudo pois o Nd possui elevado grau de complexidade para realizar o projeto e o processo de fabricação. A **Figura 2** representa o esquemática das fronteiras do sistema e modelagem da produção do minério virgem. Note que a rota de reciclagem se encontra delimitada separada dos demais processos, apenas

de forma representativa pois não será adicionada ao estudo (*Cradle-To-Gate*).

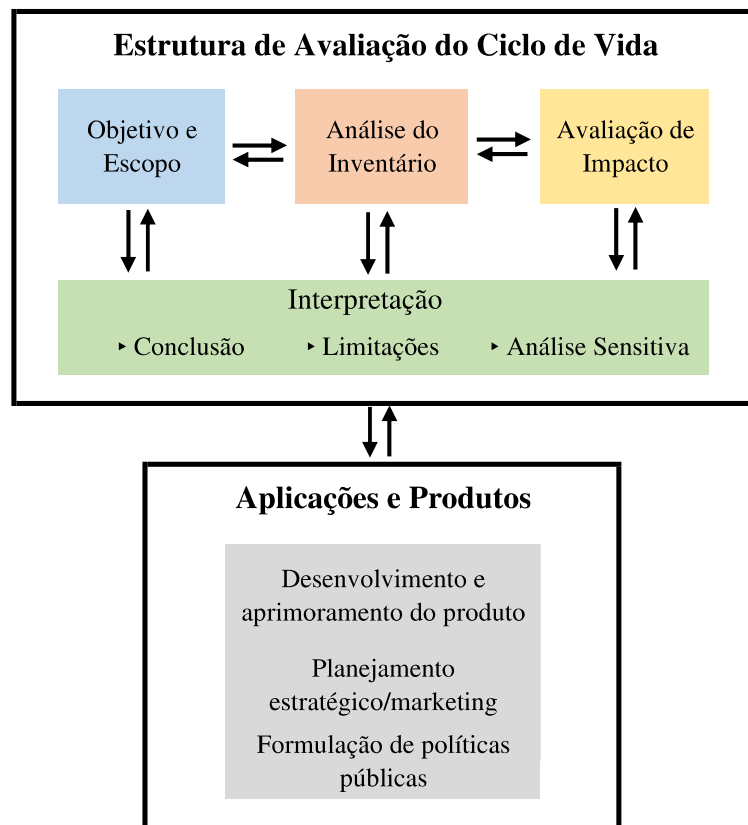
Figura 2 – Diagrama do ciclo básico da produção e reciclagem do minério Nd e ferrite.



fonte: (Próprio Autor)

O ICV dos materiais que compõe um alto-falante de Nd e de ferrite foi realizado no *software* OpenLCA e GaBi. O inventário compreende todas as intervenções ambientais dos processos modelados para a produção conforme **Figura 3** representa as etapas da ACV aplicada ao produto estudado.

Figura 3 – Modelo de estrutura para Avaliação do Ciclo de Vida.



fonte: (Adaptado de NBR ISO 14040, 2009)

Durante a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso foram pesquisados materiais referentes ao assunto para consolidar sua escolha como tema do trabalho, e para o devido embasamento teórico que foi exigido ao longo de sua preparação. Como fontes de pesquisa foram considerados livros, trabalhos acadêmicos, artigos publicados, sites relacionados ao assunto e o apoio do professor-orientador.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em 6 Capítulos, sendo eles apresentados na ordem que permite melhor entendimento do tema proposto desde os conhecimentos básicos como teóricos de funcionamento do produto e etapas da avaliação.

- No Capítulo 1 apresenta o tema, abordado sua importância e justificativa.
- O Capítulo 2 traz a descrição geral de um alto-falante, seus aspectos teóricos e técnicos de forma geral.
- O contexto do Capítulo 3 enfatiza o modelo de gestão ambiental e a ISO correspondente a esta pesquisa.
- A ACV se encontra no Capítulo 4, segmentado em subseções bem definidas das fases adotadas do inventário e a descrição dos processos para a AICV. Os resultados e os cenários identificados são apresentados também neste capítulo, enfatizando a diferenciação e impactos de cada material estudado.
- O Capítulo 6 traz as conclusões do estudo e observações detalhadas acerca do tema.
- Por fim, o Capítulo 7 traz as referências utilizadas neste estudo.

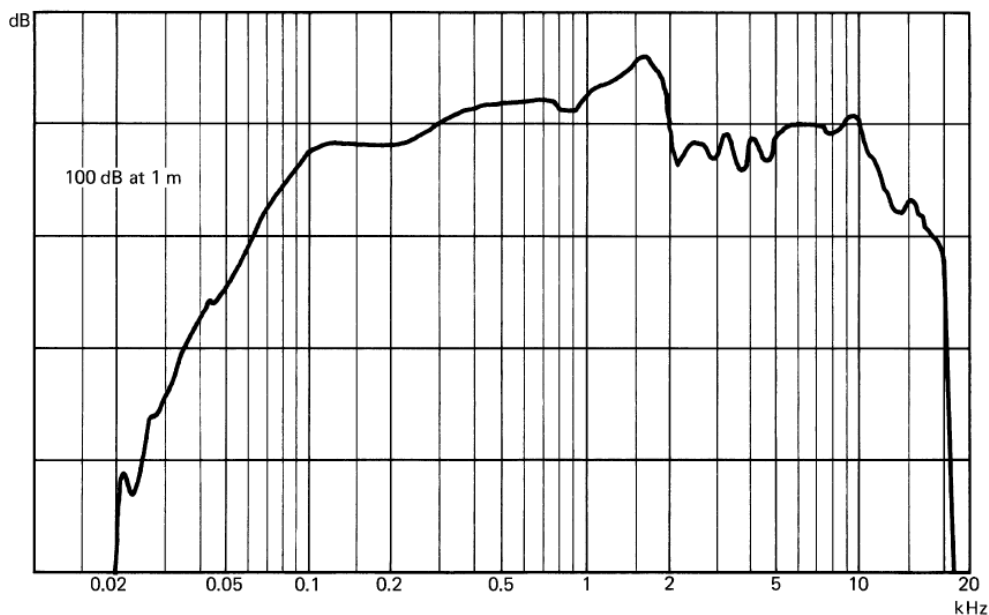
2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DE ALTO-FALANTE

2.1 ASPECTOS TEÓRICOS

Os melhores alto-falantes ou transdutores acústicos (conversor de energia de uma natureza para outra) recriam o som muito próximo do original, mas não idêntico, o ideal é ouvir um som como de um trompete da mesma forma que foi planejado por quem quer que tenha gravado, além de diversos outros fatores que interferem na fidelidade da reprodução que serão abordados ao longo deste capítulo.

A medida de teste mais importante e informativa é a resposta em frequência do alto-falante. A resposta em frequência tem duas componentes, amplitude e fase, que juntas definem completamente o comportamento linear do sistema realizando uma varredura definindo a faixa de frequência/banda que o alto-falante produz [8,14]. O objetivo principal é obter um alto-falante que possa produzir o máximo de frequências que o ouvido humano possa ouvir de forma mais fiel possível. A **Figura 4** representa um modelo realizado a partir de um sistema de alto-falantes.

Figura 4 – Representação da resposta em frequência de um sistema de alto-falante de duas vias da década de 70.



fonte: (Adaptado de JBL L100 Century Series Owner Manual, 1970s)

Cada alto-falante produz frequências que são mais altas ou mais suaves que outras e, supondo que tenha como objetivo final a reprodução de áudio precisa, quanto menor a variação de intensidade entre as frequências, ou quanto mais achatada for a resposta de frequência, melhor será a qualidade do alto-falante. Em um gráfico de resposta em frequência é desejável ver uma linha reta em vez de uma linha com picos e vales, teoricamente.

Dado um sinal ideal de uma fonte de áudio e amplificador ideal, as variações da resposta de frequência plana podem frequentemente ser atribuídas à maneira como um alto-falante é construído. Quando observadas as especificações dos alto-falantes encontrados no mercado, é possível verificar a variedade de materiais dos quais podem ser constituídos. Por exemplo o cone de propagação pode ser feito de papel, alumínio (Al), polipropileno ou polímero de fibra de vidro / cerâmica. A maioria dos cones de propagação de um alto-falante funciona basicamente como um pistão, em certas frequências, os cones se flexionam e a ação de flexionar distorce o som depreciando a qualidade sonora.

Os materiais usados em todas as etapas de construção, desde os fios até a cola, em um alto-falante, podem afetar no resultado do som produzido. Como exemplo, o formato cônico de um alto-falante e sua disposição podem apresentar diferença na qualidade final. Essas são apenas partes do quebra-cabeça e a maneira como esses elementos são montados também afeta o resultado.

Em relação estrutural, a maioria dos alto-falantes usam basicamente a mesma dinâmica de funcionamento e montagem, na parte traseira do conjunto um ímã geralmente circular é mantido firmemente no lugar em uma estrutura rígida. À medida que o alto-falante é alimentado, mudanças no campo elétrico fazem com que uma bobina de cobre (Cu) dentro do ímã se desloque. Anexada a este existe uma membrana, geralmente feita de papel ou plástico, que se move em conjunto para frente e para trás deslocando o ar, criando assim ondas sonoras.

Quando a corrente elétrica flui em uma direção, a membrana se afasta do ímã e quando flui para o outro lado, a membrana se aproxima. O fluxo de corrente é alterado de um lado para outro correspondendo à frequência das ondas sonoras induzidas. Para baixas frequências (graves), isso pode ser algumas dezenas de vezes por segundo. Para altas frequências (agudos), isso acontece até 20.000 vezes ou mais por segundo[8].

O tamanho de um alto-falante afeta as frequências de áudio que ele pode produzir, desta forma um alto-falante maior pode mover mais ar, mas não de forma rápida, tornando-o melhor para produzir frequências mais baixas. Já um alto-falante menor não movimenta tanto ar e conseqüentemente pode se mover muito mais rápido, tornando-o melhor para produzir frequências mais altas. Devido a isso, a maioria dos sistemas que buscam uma reprodução mais fiel e o preenchimento faixa de espectro audível do ouvido humano necessita de múltiplos alto-falantes. Alguns sistemas possuem apenas um único alto-falante como por exemplo, um telefone que atende ao propósito de atuar na faixa de frequência da voz humana de forma satisfatória [8].

Um sistema de alta fidelidade possui geralmente dois ou mais alto-falantes, sendo composto na maioria dos casos por um *woofer* para frequências baixas, o *midrange* para médias e para alta o *tweeter*. As frequências médias, que abrangem a faixa da maioria dos vocais, geralmente são produzidas pelo *midrange*, embora algumas caixas acústicas deixem o *woofer* com esse papel, o que conseqüentemente deprecia a qualidade. A [Figura 5](#) exemplifica uma caixa acústica composta por três alto-falantes da década de 1970.

Figura 5 – Modelo de três vias JBL L100.



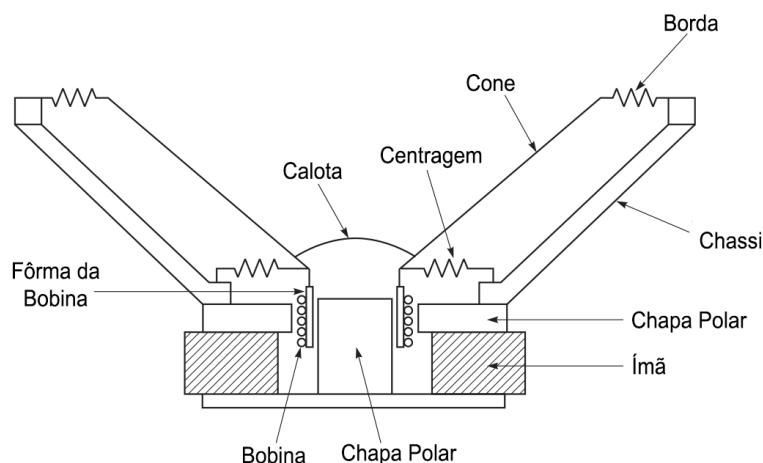
fonte: (Adaptado de JBL L100 Classic 3-way Bookshelf Loudspeaker, 2018)

Desta forma, podemos compreender a complexidade e a quantidade de materiais envolvidos para a fabricação de um alto-falante que atenda as características básicas de reprodução sonora, ou seja, que tenha um espectro completo capaz de produzir todas as frequências que o ouvido humano é capaz de ouvir.

2.2 PROCESSO DE MANUFATURA E MATERIAIS

O princípio básico de um alto-falante pouco se alterou desde que foi patenteado por Ernst Siemens em 1874. Siemens descreveu sua invenção como um meio de obter o movimento mecânico de uma bobina elétrica a partir de correntes elétricas que fluíam através dela. Seu processo de manufatura também não se alterou drasticamente, o seu princípio e ordem de montagem ainda se mantém. A [Figura 6](#) exemplifica as etapas de um modelo representativo de um alto-falante e suas partes [24]. Em seguida uma breve descrição de cada componente e sua etapa de fabricação.

Figura 6 – Modelo representativo de um alto-falante de ferrite.



fonte: (Adaptado de Borwick J., 2001)

- Ímã - O ímã de ferrite é construído misturando Óxido Férreo (Fe_2O_3) com Estrôncio (Sr) e depois moendo o composto em partes finas. O composto é misturado com um aglutinante de cerâmica e depois compactado formando o metal para então finalizar no forno e sinterizar unindo a mistura. Em seguida é realizada a magnetização se tornando propriamente um ímã que possui papel fundamental para o funcionamento do alto-falante, pois ele fornece o campo magnético permanente presente na chapa polar. Seu formato é circular com uma abertura central como um anel. Já para o processo do ímã de Nd, não será descrito as etapas de fabricação pois mais detalhes não foram fornecidos pela empresa.
- Chapa Polar - Também chamado de entreferro, a chapa polar chega em folhas de aço para a fábrica no qual é realizado o corte a plasma em forma de arruela. Algumas empresas no Brasil possuem máquinas de usinagem para polir e fazer a furação antes de realizar a zincagem eletrolítica do material para a proteção e conservação. A peça polar foi projetada para conduzir o campo magnético a fim de posicioná-lo no entreferro.
- Chassi - É construído a partir de uma chapa de alumínio ou aço em que a folha chega na fábrica pré-moldada. Em seguida, é colocado em uma correia transportadora para uma máquina de corte seguindo para a prensa hidráulica que define o formato dos furos de montagem adequados na chapa. Chamado também de carcaça é a base da estrutura do alto-falante. Feita geralmente de aço ou alumínio. Nela são coladas as peças polares, o ímã, a centragem, o cone, ou seja, todos os componentes do alto-falante.

As demais partes do alto-falante são montadas, coladas e parafusadas manualmente pois ainda não se tem máquinas precisas o suficiente para realização das etapas finais de montagem.

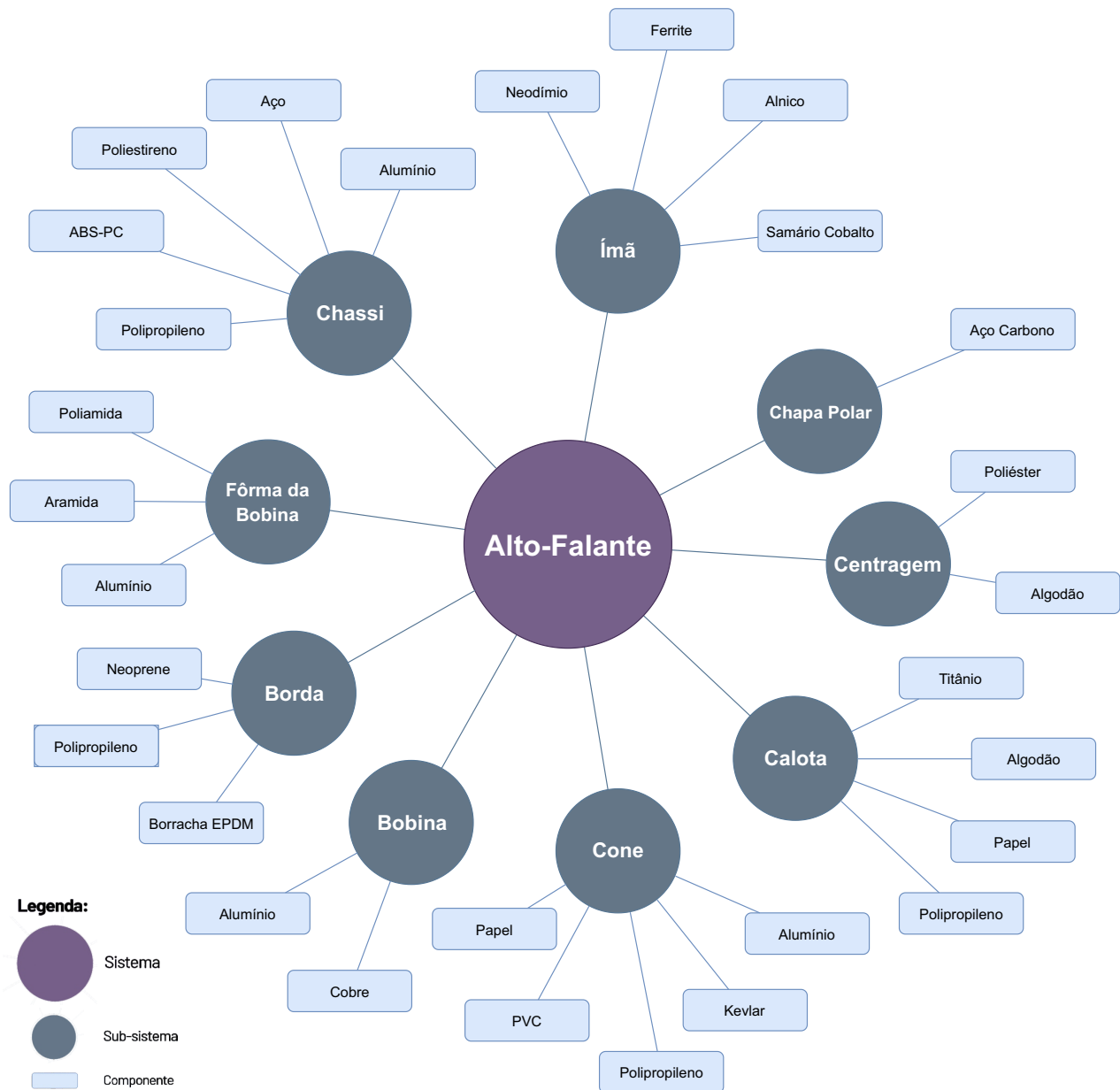
- Centragem - Tem como função fixar a bobina centralizada no entreferro equidistante ao polo. Sua flexibilidade permite ao cone e a bobina um movimento oscilatório na vertical.

- Cone - Juntamente com a bobina vibram na frequência induzida e deslocam ar para a geração do som. Encontrado normalmente em papel ou em polipropileno. É uma das partes que afetam diretamente a qualidade da reprodução.
- Calota - Localizada e colada no centro do cone, tem o propósito de proteger a bobina de sujeira e fatores externos que podem afetar sua integridade.
- Borda - A borda ou suspensão é uma extensão do cone, normalmente feita de borracha, que é colada na parte superior da carcaça e que também tem a função de manter a bobina centralizada na chapa polar.
- Bobina - É enrolada em volta da fôrma da bobina que fica localizada na chapa polar imersa em campo magnético neste componente. É induzida uma corrente alternada que gera o deslocamento do conjunto determinando o movimento da bobina que também movimenta o cone.
- Fôrma da Bobina - Responsável pela sustentação e estrutura da bobina, necessário que seja rígida, leve e resista a temperaturas altas devido à proximidade da bobina que encarrega de conduzir e liberar parte da energia recebida em calor.

O cone, a borda e a centragem são montados individualmente e colados juntos como um conjunto. A estrutura, a chapa polar e o ímã permanente são parafusados juntos formando o conjunto magnético. O conjunto do cone é então anexado ao chassi e a centragem na sua base, e em seguida, colando a borda do cone ao topo do chassi.

Após a montagem completa o alto-falante é conectado a um gerador de áudio a um analisador de espectro que plota a resposta em frequência e os parâmetros de desempenho do alto-falante para garantir que ele esteja dentro das especificações necessárias. A **Figura 7** representa, em forma de mapa, os materiais mais comuns para cada componente de um alto-falante, a legenda de cores foi definida em três camadas, sendo dos materiais para as componentes, do tom mais claro ao escuro respectivamente.

Figura 7 – Mapa representativo de componentes e materiais de um alto-falante.



fonte: (Próprio Autor)

3 GESTÃO AMBIENTAL

3.1 MODELO ADOTADO

É sugerido que uma das primeiras etapas da caracterização do produto tenha início na concepção, seguindo para o design e desenvolvimento. Isto será relacionado futuramente no Capítulo 4 à integração de ferramentas e métodos de confiabilidade, manutenibilidade e análise para melhor desempenho. Estas etapas podem ser usadas como uma ponte para se obter melhorias e ter mais confiabilidade que envolvam todo o ciclo de vida do produto [13,22]. As etapas básicas do ciclo de vida do projeto podem ser identificadas na **Figura 8**:

Figura 8 – Modelo conceitual cíclico das fases de lançamento e análise de um produto.



fonte: (Próprio Autor)

É necessário além do planejamento, o estudo e aprofundamento teórico de um alto-falante para determinar quais as etapas que possuem maior peso na qualidade e desempenho do produto, pois o esperado é que seja durável e que atinja a qualidade especificada até o fim da vida do produto.

Como descrito anteriormente o funcionamento de um alto-falante se dá pelo processo eletromecânico do sinal de áudio amplificado que move o cone do alto-falante para produzir sons correspondentes à onda sonora original do sinal. O amplificador, necessário para o funcionamento do produto, amplia o sinal elétrico para alimentar as bobinas e transfere o sinal elétrico para as mesmas. Isso cria uma sequência vibratória na bobina correspondente às variações do sinal sonoro original. O objetivo desta bobina é alimentar o cone que conduz o ar que o rodeia, e este, por sua vez, produz som de áudio para o exterior do produto.

A bobina está conectada ao diafragma do alto-falante, posicionado no espaço aéreo de um sistema magnético, com o auxílio de uma suspensão flexível entorno do alto-falante. Imediatamente a corrente flui através da bobina na presença de um campo magnético, tanto o diafragma quanto a bobina são acelerados como resultado da força de Lorentz [8]. A natureza da bobina e o tipo de invólucro interferem criticamente na qualidade do som produzido pelo alto-falante, buscando sempre a fidelidade, portanto, é necessário reestruturar e projetar esses componentes de forma a aumentar sua qualidade a partir de melhores materiais.

Para atender aos requisitos mínimos de qualidade que um sistema profissional de alto-falante exige, é necessário a composição de um ou mais alto-falantes, sendo cada um deles aplicados para determinadas faixas de frequência e suas características, tamanho e material utilizado, como fator determinante. Para um desempenho mais confiável e qualidade sonora, temos que levar em consideração também o projeto acústico do gabinete que envolve e fixa o alto-falante. A definição e os parâmetros de todo o sistema estão atrelados à etapa de concepção do produto na finalidade que ele irá suprir.

O ciclo de vida completo do alto-falante leva em consideração em todas estas etapas, desde o estágio de fabricação dos componentes, a montagem, até a distribuição dinâmica dos alto-falantes no sistema completo. Assim, é possível definir o desempenho do alto-falante e projetar sua durabilidade, que pode ser calculada por modelagem computacional via *software* de acústica e mecânica com objetivo de identificar os principais fatores de desempenho do produto antes da produção do mesmo, visando escolha de materiais melhores que mantenham os requisitos mínimos de qualidade sonora, evitando assim resultados divergentes pós-produção.

3.2 NORMAS ISO

Existem normas que orientam as organizações, para que se adequem ao contexto de melhoria dos aspectos ambientais relacionados às suas atividades. Essas normas incluem planos dirigidos para tomadas de decisão que contribuam para prevenção dos impactos ambientais como, contaminação do solo, água, ar. As normas ISO 14000 tratam sobre o que a organização deve fazer para minimizar os efeitos nocivos ao ambiente, causados pelas suas atividades[1,2].

Como mostra a Tabela I, a série ISO 14040 trata da Avaliação do Ciclo de Vida, especificando sua estrutura geral e orientando a elaboração de cada uma de suas fases [1,2]. Também fornece exemplos de algumas das formas de aplicação da ACV e padrões para a apresentação de dados.

Tabela 1 – Normas ISO – Avaliação do Ciclo de Vida.

ISO: Ano	Norma
14040:1999	Princípios e estruturas.
14041:1998	Objetivos e escopo, definições e análise de inventários.
14042:2000	Avaliação do impacto de ciclo de vida.
ISO/TR 14043:2000	Interpretação dos resultados de um estudo da ACV.
ISO/TS 14048:2002	Informações sobre a apresentação de dados para um estudo da ACV.
ISO/TR 14049:2002	Exemplos para a aplicação da norma ISO 14041:1998.
ISO 14040:2016	Princípios e estruturas (corrigida).

fonte: (Adaptado de Barbieri, 2007)

4 MÉTODO DE PESQUISA

4.1 OBJETIVO E ESCOPO ISO 14040

O estudo abrange inicialmente parte do ciclo de vida do modelo de alto-falante escolhido, desde a aquisição, fabricação até o uso de matéria-prima. A unidade funcional para o cenário, base comparativa dos modelos de alto-falantes apresentados, é o uso de uma bobina contendo a mesma massa a fim de realizar a análise dos materiais envolvidos.

O ICV é baseado na lista de materiais, em um desmembramento do produto e suas partes e subpartes [1]. Também serão adicionados e modelados os processos de terceiros como recebimento de matéria prima e escoamento do produto. Foram solicitados inicialmente à empresa os dados primários sobre os processos desde a produção até o consumo de energia e combustível, se existente. Até o momento deste estudo os dados adquiridos foram declarações da quantificação do insumo e as etapas básicas de montagem. No entanto, nem todos os processos usados na avaliação abrangem todas as categorias de impacto. Será descrito mais detalhadamente ao longo deste capítulo.

Como objeto de estudo, será realizado o levantamento técnico e material de dois modelos de alto-falantes, sendo um de alto desempenho e outro de baixo desempenho ilustrados detalhadamente na Tabela 2. Os materiais básicos utilizados em sua fabricação podem ser encontrados no *datasheet* do produto bem como suas dimensões em anexo. Alguns métodos matemáticos serão utilizados para definir a quantidade de material, este método será melhor descrito no próximo capítulo.

Tabela 2 – Modelo e material dos alto-falantes.

Modelo	JBL 2216Nd	JBL 15CV5
		
Componente	Material	
Ímã	Neodímio	Ferrite de bário
Chapa Polar	Chapa de Aço	Chapa de Aço
Bobina	Alumínio	Cobre
Forma da bobina	Fibra de Vidro	Poliimida (kapton)
Cetragem	Fibra de Aramida	Fibra de Poliamida
Cone	Papel compactado	Celulose fibra longa
Calota	Papel compactado	Papelão compactado
Borda	Nylon e Algodão	Policloropreno (SBR)
Chassi	Liga de Alumínio	Chapa de aço

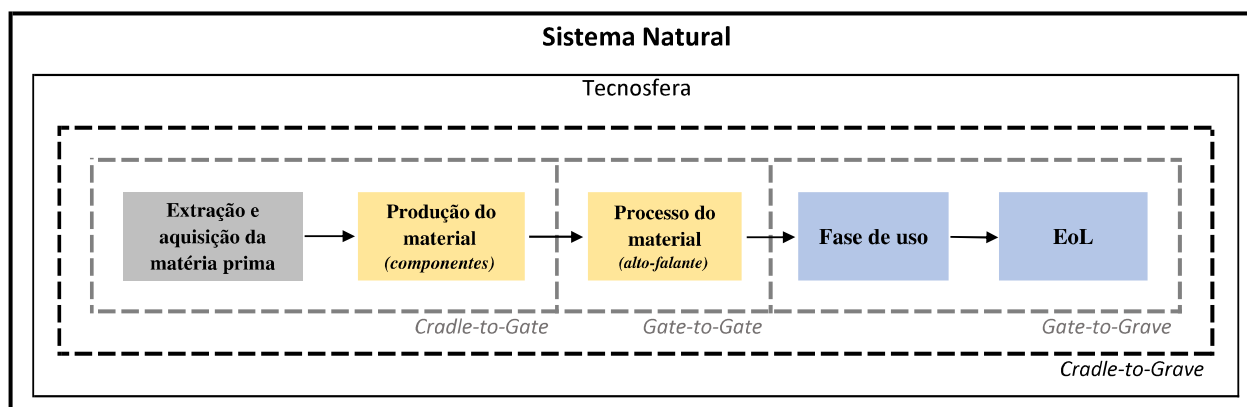
fonte: (Próprio Autor)

4.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

4.2.1 Descrição geral do ICV

O inventário do ciclo de vida é a fase da ACV que envolve a compilação e a quantificação de entradas e saídas de matéria e energia ao longo do ciclo de vida do produto [1]. De acordo com a ISO 14041 a análise envolve procedimentos de coleta e cálculo de dados para permitir quantificar os insumos como energia, matérias-primas, emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos do processo produtivo. Portanto, com uma fronteira do sistema bem delimitada, consegue-se identificar todas as etapas envolvidas no sistema de produto, buscando a quantificação de todos os aspectos ambientais de cada uma destas etapas. Os dados de um ICV podem ser diferenciados pela sua origem ou ainda, pelo seu nível de proximidade do produto, podendo ser primários e secundários, sendo o primeiro coletado pelo próprio autor e o outro retirado de relatórios, bases de dados e outros estudos publicados. O inventário do ciclo de vida é dividido conforme a **Figura 9**.

Figura 9 – Modelo de fases do ciclo de vida e suas fronteiras.



fonte: (Próprio Autor)

Assim são definidas as fronteiras do sistema, previsto pela ISO 14040 (2016). Será abordado apenas a fase de aquisição de matéria prima (*Cradle-To-Gate*) e processo do material (*Gate-To-Gate*), pois as demais etapas como de Uso e EoL se tornam mais complexas e exige o fornecimento de maiores detalhes da linha de produção.

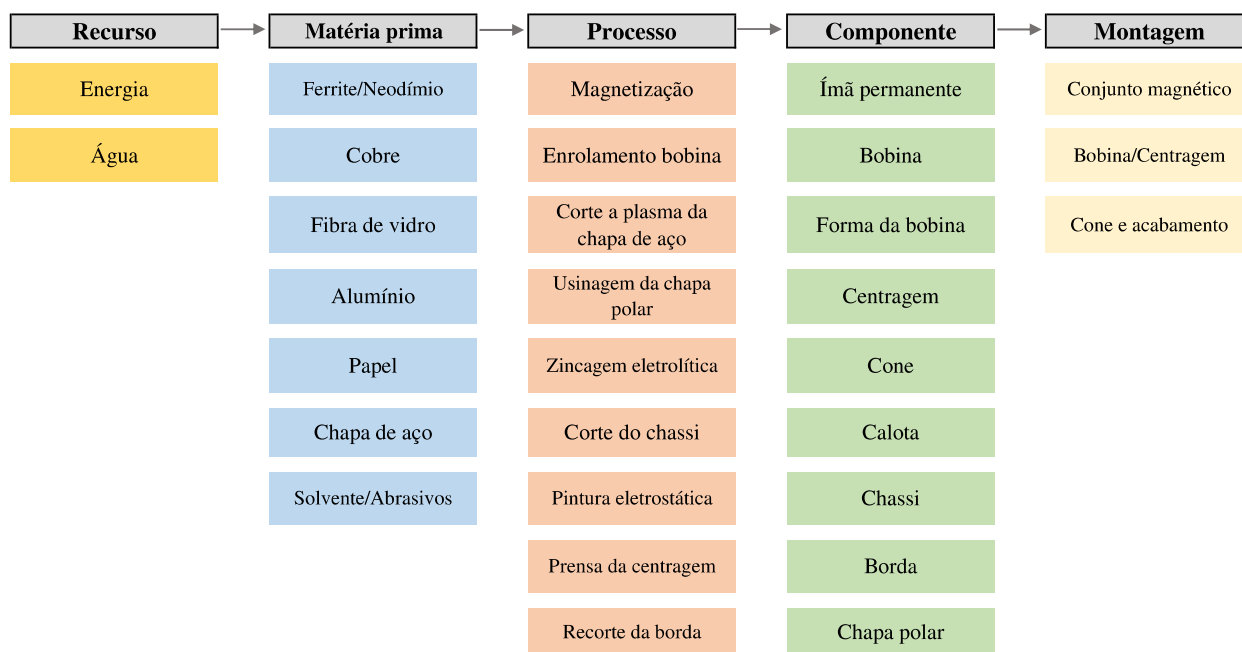
4.3 AQUISIÇÃO DE MATÉRIA PRIMA

A etapa de aquisição dos materiais inclui transporte e o deslocamento das principais matérias primas do alto-falante. No caso do Nd a extração ocorre na China [20,23] e o envio para o Brasil ocorre via transporte marítimo. As demais como o alumínio e cobre, por exemplo, são fornecidos por empresas regionais. Já em relação ao transporte de caminhões, para a etapa de manufatura do produto há uma influência menor, pois a matéria prima é obtida na própria região no polo industrial. Já as emissões do transporte de materiais causam uma parcela menor das emissões gerais do ciclo de vida do produto, que será melhor abordado ao decorrer deste capítulo. Este cenário será aplicado às etapas correspondentes na modelagem no *software*.

4.4 PROCESSOS E COMPONENTES

Segmentar o produto em módulos, no inventário primário, reflete na possibilidade de ajustes individuais em análises futuras com alterações dos componentes do produto. Dessa forma há possibilidade de encontrar soluções a partir de cenários estipulados [15]. Na **Figura 10** é definido o diagrama básico das etapas de produção de um alto-falante, desde a etapa de aquisição de matéria prima até a montagem. Neste diagrama é possível identificar os módulos para uma melhor representação e análise na etapa correspondente da ACV.

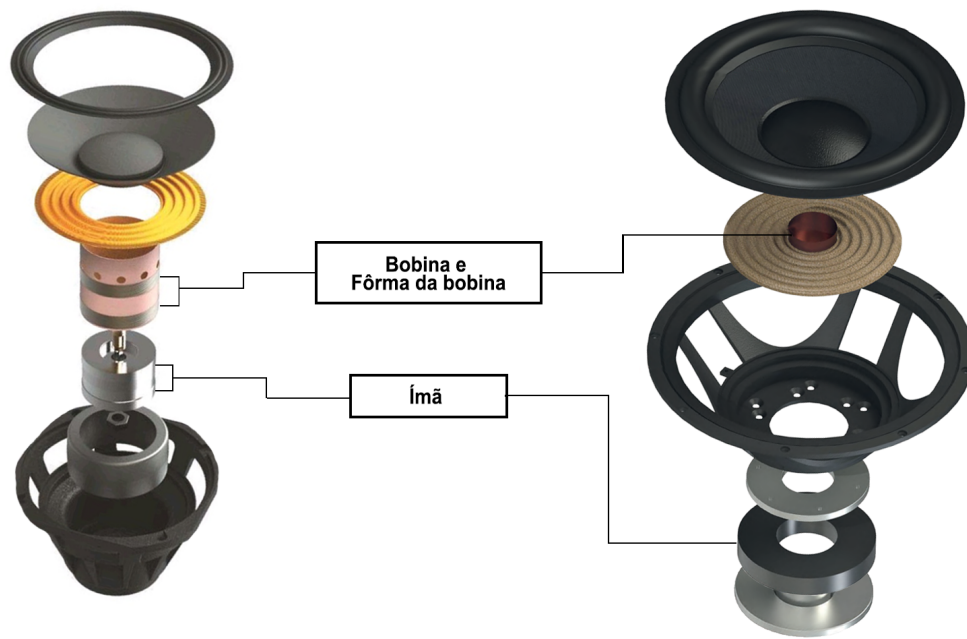
Figura 10 – Diagrama geral das etapas de produção de um alto-falante.



fonte: (Próprio Autor)

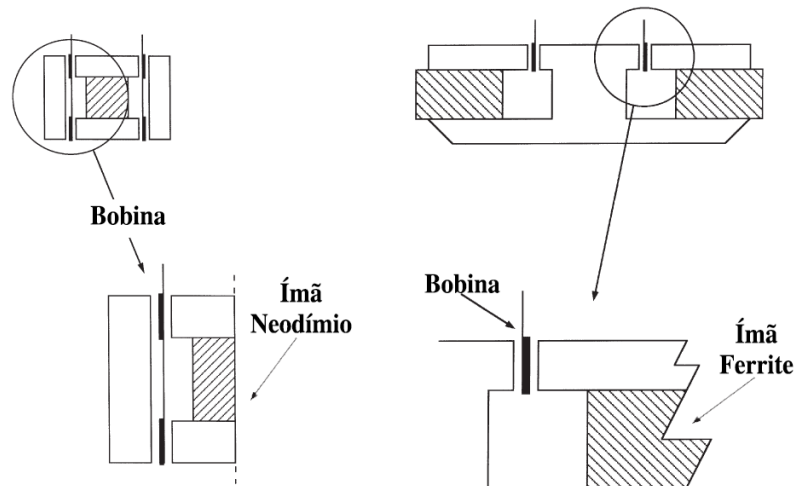
Definidos todos os processos e materiais necessários foi realizado o levantamento no banco de dados dos *software* OpenLCA e GaBi para verificar a disponibilidade dos mesmos. Devido a base de dados das principais plataformas de modelagem estarem em desenvolvimento e expansão, se torna complexo conseguir todos os dados necessários para a modelagem completa do alto-falante. Desta forma, foram escolhidos os materiais encontrados no banco de dados disponível para esta pesquisa. Será realizada, aprofundada e estudada a comparação entre os materiais e os processos necessários para a fabricação das bobinas e fôrma da bobina dos dois alto-falantes. Sendo assim, os principais componentes analisados do produto são mostrados na [Figura 11](#) e com ênfase na bobina em vista lateral dos dois tipos de alto-falantes na [Figura 12](#).

Figura 11 – Vista em três dimensões ressaltando as componentes da pesquisa.



fonte: (Adaptado de Donelan, M., 2017)

Figura 12 – Vista lateral do conjunto magnético do modelo de alto desempenho (esquerda) e de baixo desempenho (direita).



fonte: (Adaptado de Button, D., 2002)

O modelo adotado para o cálculo da massa de cada material que compõe a bobina e a fôrma da bobina é definido na Tabela 3 a partir da densidade e volume do material. Os valores para o cálculo do volume e densidade foram retirados do *datasheet* disponível no Anexo A.

Tabela 3 – Método analítico para comparação e validação dos valores de massa.

	Bobina		Fôrma		Ímã	
Material	Alumínio	Cobre	Fibra de Vidro	Poliimida	Neodímio	Ferrite
Densidade do material [g/cm ³]	2.7	8.96	2.5	1.14	7.5	5.1
Volume [cm ³]	15.08	0	0.00827	0	36.84	180.4
Massa [g]	40.72	0	0.207	0	276.32	920

fonte: (Próprio Autor)

Os valores destacados em amarelo representam o alto-falante de alto desempenho e os representados em verde de baixo desempenho. Vale ressaltar que alguns valores de massa já estavam diretamente descritos no *datasheet*, mas, foram refeitos a critério de comparação e validação para serem atribuídos nos fluxos da modelagem realizada pelo *software*. Os valores sem preenchimento não foram calculados analiticamente devido à falta de dados no *datasheet* e o fornecimento parcial oferecido pela empresa devido a atrasos na documentação do contrato de confidencialidade. Neste caso foi estipulado o mesmo valor de massa do alto-falante de alto desempenho a fim de delimitar a análise deste componente apenas entre a comparação de material. Em relação a fôrma da bobina do alto-falante de baixo custo, o material definido pelo *datasheet* é a Poliimida que foi substituído pelo alumínio devido a limitação no banco de dados do *software* e não sofrendo grandes desvios no escopo visto que o alumínio é vastamente utilizado em fôrmas para bobinas [8].

A critério de um melhor entendimento acerca de como mensurar a massa dos materiais de um alto-falante a partir do *datasheet*, será descrito um exemplo. Para o cálculo de um ímã, podemos encontrar em *datasheet* a descrição do diâmetro interno/externo e de sua altura. Com estes valores podemos calcular a área da superfície do anel e multiplicar pela altura. Assim encontraremos o volume do material, restando por último apenas multiplicar pela densidade, e como resultado teremos a massa. Nem sempre encontramos os dados de forma direta, sendo necessário em alguns casos calcular outras partes do alto-falante para indiretamente encontrar o valor em questão. Lembrando que este método depende dos dados publicados comercialmente pelo fabricante, visto que os manuais e *datasheet* podem conter erros e valores menos precisos que se realizado a coleta de dados diretamente com a empresa.

4.5 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Os modelos da AICV selecionam questões ambientais, chamadas categorias de impacto, e usam indicadores de categoria para condensar e explicar os resultados do ICV. Os indicadores de categoria são usados para refletir sobre o uso agregado de emissões ou recursos de cada categoria de impacto. Esses indicadores de categoria representam os potenciais impactos ambientais. A AICV é um processo qualitativo/quantitativo que permite compreender e avaliar a magnitude e a significância dos impactos ambientais com base nos resultados obtidos na análise do inventário. Objetiva e auxilia na obtenção de uma impressão geral dos efeitos ambientais causados por um complexo conjunto de intervenções [17].

A importância da etapa de avaliação dos impactos reside na simplificação dos resultados, uma vez que os mesmos se tornam mais compreensíveis e de fácil comunicação. A redução do número de parâmetros resultantes se torna necessário, considerando que o inventário pode conter mais de 1000 parâmetros, número este que na avaliação de impactos pode ser reduzido a aproximadamente 15 [5,17]. Em análise do estudo, muitas vezes, a categoria de impacto é mais compreendida do que as emissões que causam o referido impacto, sendo mais fácil compreender as consequências da acidificação do que a emissão da substância causadora.

A norma para a realização da avaliação de impactos, divide esta tarefa obrigatoriamente em definição das categorias de impacto, classificação e caracterização, forma que serão tratados todos os dados gerados pela modelagem e pela análise do inventário. Com base nos fluxos de material definidos no ICV, a AICV será realizada de acordo com a metodologia CML 2001, Environmental Footprint 2.0, ReCiPe 2019 v1.1 Midpoint e TRACI 2.1 usando o *software* GaBi e OpenLCA. A interpretação dos resultados será levado em conta apenas a metodologia TRACI 2.1. Esta além de estar disponível no *software* GaBi, é utilizado no estudo de referência para a produção do ímã de ferrite e Nd, discutidos no próximo capítulo.

4.6 DEFINIÇÃO DA CATEGORIA DE IMPACTO

Para as categorias de impacto abordadas neste estudo da ACV, são utilizadas as seguintes definições representadas na Tabela 4 e detalhadas subsequentemente:

Tabela 4 – Principais categorias e indicadores.

	Categoria	Descrição	Indicador
TRACI 2.1	GWP	Potencial de aquecimento global	kg CO ₂ eq.
	AP	Acidificação	kg SO ₂ eq.
	EP	Eutrofização	kg N eq.
	ODP	Depleção de ozônio	kg CFC 11 eq.
	Ecotoxicidade	Ecotoxicidade (ar)	CTUe
	Toxicidade humana	Toxicidade humana (poluentes)	kg PM _{2.5} eq.
	Recursos fósseis e combustíveis	Esgotamento de combustíveis fósseis	MJ
	Poluição (smog)	Formação de fumaça (smog)	kg O ₃ eq.

fonte: (Próprio Autor)

Como resultado da modelagem do *software* GaBi, foram obtido os dados para as quatro metodologias, mas, a análise será feita pela TRACI 2.1, por possuir indicadores voltados para a área industrial primária da América do Norte e se adequando tanto para a manufatura quanto para a região (as demais metodologias são europeias). Os demais dados obtidos nas outras metodologias estão detalhados no Apêndice B. A seguir serão exemplificadas em tópicos as categorias mais relevantes para o cenário de extração de matéria prima e produção de alto-falantes da metodologia TRACI 2.1 [7].

- Mudança climática - Potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Potential*) é o efeito referente ao aumento da temperatura na atmosfera mais baixa, normalmente aquecida pela radiação recebida da atmosfera externa na qual parte da radiação é normalmente refletida para a superfície da terra e para os oceanos. Com o conteúdo de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases como por exemplo, metano (CH₄) e dióxido de nitrogênio (NO₂) na atmosfera refletem a radiação infravermelha (IR), ou seja, aumento da temperatura na atmosfera mais baixa para um nível acima do normal. O GWP para gases de efeito estufa é expresso como equivalente de CO₂ [17].
- Acidificação - Se refere a concentração crescente de íons hidrogênio em um ambiente. Isso pode ser o resultado da adição de ácidos como por exemplo, ácido nítrico (HNO₃) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) ao meio ambiente ou pela adição de outras substâncias como a amônia (NH₃), que aumentam a acidez do ambiente devido a reações químicas. Substâncias acidificantes

geralmente são emissões atmosféricas, que podem viajar centenas de quilômetros antes da deposição "molhada" como chuva ácida, neblina ou neve ou deposição "seca" como poeira ou partículas de fumaça no solo ou na água. O dióxido de enxofre (SO_2) e os óxidos de nitrogênio da combustão de combustíveis fósseis têm sido os maiores contribuintes para a chuva ácida. Consequentemente as substâncias que causam acidificação podem causar danos aos materiais de construção, tintas e outras estruturas, lagos, córregos, rios e várias plantas e animais [17].

- Eutrofização - É o enriquecimento de um ecossistema aquático com nutrientes como nitratos e fosfatos que aceleram a produtividade biológica e crescimento de algas e ervas daninhas em um acúmulo indesejável de biomassa de algas. Embora o nitrogênio (N) e o fósforo (P) tenham um papel importante na fertilização de terras agrícolas e outras vegetações, a liberação excessiva de qualquer uma dessas substâncias pode proporcionar efeitos indesejados [17].
- Ecotoxicidade - Abrange os possíveis efeitos de substâncias tóxicas liberadas durante o ciclo de vida de um produto para o meio ambiente. As fontes de substâncias tóxicas são bem diferentes, dependendo do tipo de ambiente e dos métodos utilizados na avaliação do impacto. O impacto nos sistemas aquáticos e terrestres são geralmente considerados separadamente. Em princípio, a referência de normalização para ecotoxicidade inclui todas as substâncias tóxicas emitidas para o meio ambiente devido a atividades humanas e requer dados extensivos sobre todos os tipos de emissões [17].
- Toxicidade Humana - Potencial de toxicidade humana deve refletir a carga tóxica total humana na área de referência causada pela atividade humana, o risco potencial associado à exposição do meio ambiente como resultado de emissões para o ambiente da produção industrial e tráfego. Idealmente, todas as emissões de substâncias que potencialmente afetam a saúde humana devem ser quantificadas e avaliadas. O inventário usado para calcular as referências de normalização é, portanto, baseado nos registros de emissão disponíveis para substâncias, que se acredita contribuir significativamente para a carga geral [17].
- Esgotamento de recursos fósseis/combustível - É uma função da taxa anual de extração e reserva geológica de um recurso como petróleo, gás natural e carvão, todos portadores de energia e que se supõe serem mutuamente substituíveis. Como consequência, o estoque de combustíveis fósseis é formado pela quantidade total, definido em Megajoules (MJ) [17].
- Formação fotoquímica de poluição atmosférica (*smog*) - Ocorre em presença de luz solar, esta neblina é comum nos dias quentes e secos, em sua composição encontramos (NO_2). Os efeitos na saúde humana podem resultar em uma variedade de problemas respiratórios, incluindo sintomas crescentes de bronquite, asma e enfisema. As principais fontes de emissoras são veículos automotores, concessionárias de energia elétrica e instalações industriais. Os impactos ecológicos incluem danos a vários ecossistemas [17].

4.7 RESULTADOS DAS COMPONENTES DO ALTO-FALANTE

Nesta fase o objetivo principal é realizar recomendações sobre a identificação de questões significativas do produto ou atividade que está sendo analisada durante todo o processo. A interpretação dos resultados é a etapa final de uma ACV onde os resultados do AICV serão examinados. De acordo com a NBR ISO 14040 (2016), esta fase define um procedimento sistemático para identificar, qualificar, verificar e avaliar os resultados do ICV ou da AICV, facilitando a interpretação da mesma.

4.7.1 Produção do Ímã

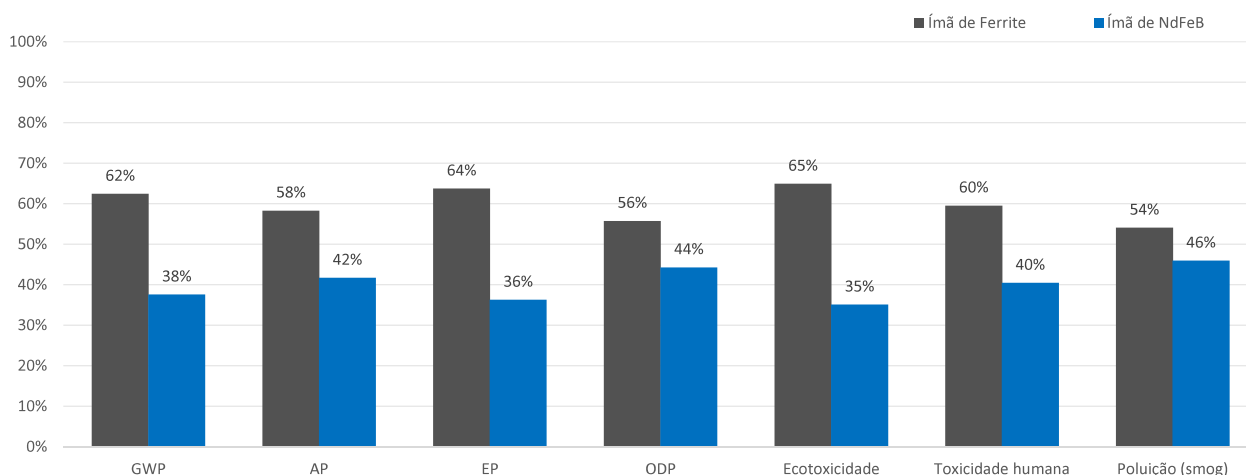
Na Tabela 5, os resultados da produção do ímã são descritos e foram elaborados com dados secundários da ACV. E na Figura 13 compara-se os impactos do ciclo de vida do ímã de ferrite com Nd.

Tabela 5 – Tabela de resultados dos materiais da produção do ímã.

<i>Categoria</i>	<i>Ferrite</i>	<i>NdFeB</i>	<i>Indicador</i>
GWP	7.69E+01 62%	4.63E+01 38%	kg CO ₂ eq.
AP	2.64E+01 58%	1.89E+01 42%	kg SO ₂ eq.
EP	7.20E-02 64%	4.10E-02 36%	kg N eq.
ODP	4.18E-06 56%	3.32E-06 44%	kg CFC 11 eq.
Ecotoxicidade	4.17E+02 65%	2.25E+02 35%	CTUe
Toxicidade humana	2.50E-01 60%	1.70E-01 40%	kg PM _{2.5} eq.
Recursos, comb. fósseis	0.00E+00 0%	0.00E+00 0%	MJ
Poluição (smog)	2.00E-01 54%	1.70E-01 46%	kg O ₃ eq.

fonte: (Adaptado de Navarro, J., 2014)

Figura 13 – Plote comparativo dos resultados do ímã em percentil.



fonte: (Adaptado de Navarro, J., 2014)

Após compreender e avaliar os materiais, processos, fluxos de energia para as duas fabricações, a maior emissão que contribui para a categoria de aquecimento global é o CO₂ (GWP) provido da etapa de produção da matéria prima base do ferrite. Além disso, a maior emissão que afeta a toxicidade humana (agentes cancerígenos) foi o arsênio (As) no ar, com o maior impacto vindo também da incineração e o processo de disposição de resíduos sólidos. Para os agentes não-cancerígenos que também fazem parte toxicidade humana, a água contaminada com Pb teve o maior impacto de emissão. E efeitos respiratórios, o maior contribuinte é o processo de beneficiamento de minério para a fabricação do ímã de ferrite. Para a categoria eutrofização, a emissão que teve o maior impacto resultou do fosfato distribuído na água e para a depleção do O₃ o CH₄ presente no ar. A queima do combustível fóssil nos fornos industriais foi o maior contribuinte para a categoria de formação fotoquímica de poluição atmosférica (*smog*) [21,25]. Os valores da categoria "Recursos, Comb. fósseis" não foram declarados pelo autor da referência.

Vale ressaltar que exclusivamente para a comparação de ímãs, para que o conjunto magnético do alto-falante de ferrite tenha eficiência igual do Nd é necessário aproximadamente quatro vezes a massa de ferrite (para ter o mesmo fluxo magnético) [25]. Nesta análise, o Nd se mostrou o material que menos contribui negativamente, visto que todas as categorias foram em média 25% menores que a do ferrite.

4.7.2 Produção da bobina

Na Tabela 6, os resultados da produção da bobina são descritos em relação a sua categoria juntamente com o indicador respectivo. Os valores em porcentagem representam uma melhor forma de comparação visto que podem variar na casa de milhares. A Figura 14 compara os impactos do ciclo de vida da bobina de alumínio com a de cobre.

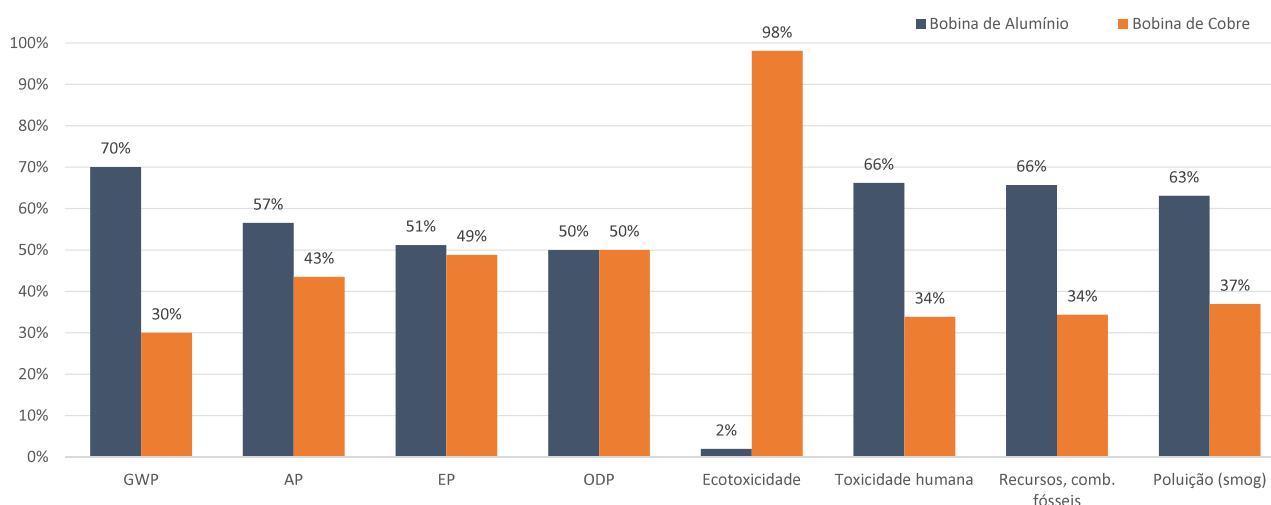
Em aproximadamente 80% das categorias, o alumínio apresentou maiores quantidades chegando em algumas em 50% de diferença. Estes números refletem principalmente a diferença no beneficiamento de minério, que é composto por uma série de processos que objetivam, a partir do material resultante

Tabela 6 – Tabela de resultados dos materiais da produção da bobina.

<i>Categoria</i>	<i>Alumínio</i>	<i>Cobre</i>	<i>Indicador</i>
GWP	3.67E-01 70%	1.57E-01 30%	kg CO ₂ eq.
AP	1.34E-03 57%	1.03E-03 43%	kg SO ₂ eq.
EP	4.09E-05 51%	3.90E-05 49%	kg N eq.
ODP	2.55E-09 50%	2.55E-09 50%	kg CFC 11 eq.
Ecotoxicidade	9.71E-03 2%	4.95E-01 98%	CTUe
Toxicidade humana	1.92E-04 66%	9.81E-05 34%	kg PM _{2.5} eq.
Recursos, comb. fósseis	3.81E-01 66%	1.99E-01 34%	MJ
Poluição (smog)	1.56E-02 63%	9.14E-03 37%	kg O ₃ eq.

fonte: (Próprio Autor)

Figura 14 – Plote comparativo dos resultados da bobina em percentil.



fonte: (Próprio Autor)

da extração, separar e concentrar os minerais desejados. Em relação categoria de aquecimento global, a emissão de CO₂ se dá principalmente por meio da combustão de combustíveis fósseis, que no caso do alumínio, após a britagem por tratores e escavadeira na etapa de extração da bauxita são necessários diversos processos industriais com maquinário de separação, lavagem (grandes quantidades de água), moagem e a disposição do rejeito separado da bauxita lavada. Para a categoria de esgotamento de combustíveis fósseis, é proporcional a quantidade de processos básicos da extração da bauxita até o produto final, pois muitos deles como a secagem da bauxita ocorre a queima direta de combustíveis fósseis.

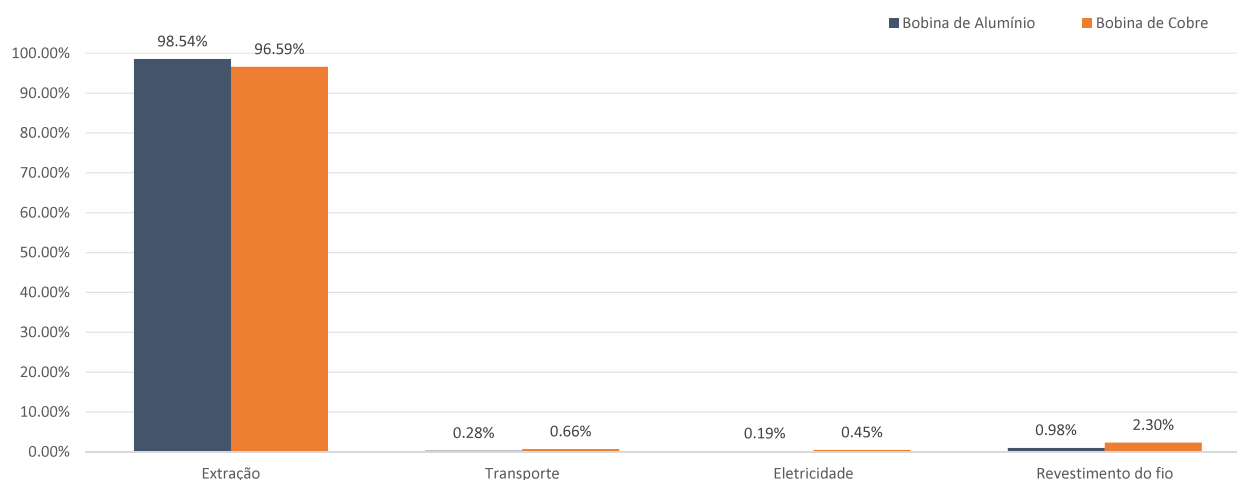
Analisando o inventário do alumínio no Apêndice A, as quantidades de emissões para o ar e

água, temos valores duas vezes maiores em relação ao cobre, como exemplo as substâncias orgânicas voláteis. Em relação ao cobre, o único valor discrepante e superior que o alumínio foi na categoria de ecotoxicidade, que pode ser justificado pelo alto valor nas emissões de partículas e metais pesados no ar. Este motivo pode ser originado do uso de chumbo e outros processos químicos necessário e que difere na produção do alumínio.

Sendo assim, em alto-falantes a escolha do cobre se torna superior no ponto de vista ambiental, mas, em relação a densidade do material o alumínio se sai melhor pois o objetivo da bobina além de conduzir é de ser leve para não influenciar no deslocamento do conjunto e consequentemente na qualidade do espectro.

A **Figura 15** apresenta os resultados da categoria GWP segmentados em seus equivalentes de processos. O processo da extração da matéria prima obteve maiores resultados, o transporte do material até a indústria (utilizado como padrão 100km) e a eletricidade para o enrolamento da bobina ficou abaixo do 1% do total desta categoria. Diferentemente dos outros componentes, o fio da bobina requer um processo adicional, o revestimento, responsável para sua isolamento e proteção. A produção dos demais componentes mantiveram valor em percentil abaixo de 1% do transporte e eletricidade e não teria relevância graficar.

Figura 15 – Plote comparativo da categoria GWP dos processos das bobinas em percentil.



fonte: (Próprio Autor)

4.7.3 Produção da fôrma da bobina

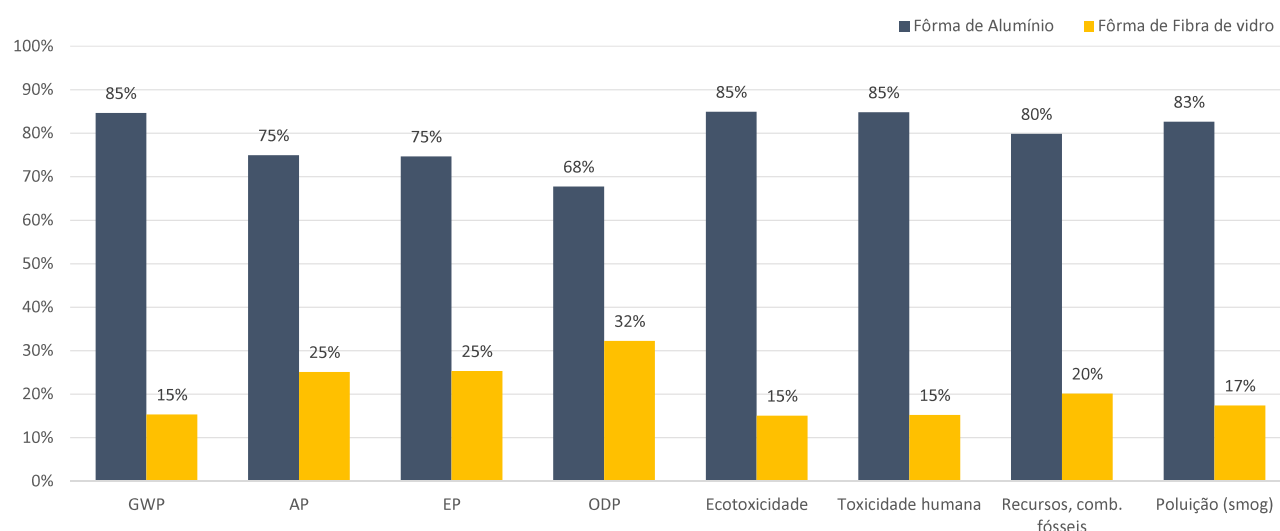
Na Tabela 7, os resultados da produção da fôrma da bobina são descritos e a Figura 16 comparando-se os impactos do ciclo de vida da fôrma da bobina de alumínio com a de cobre.

Tabela 7 – Tabela de resultados dos materiais da produção da fôrma da bobina.

<i>Categoria</i>	<i>Alumínio</i>	<i>Fibra de vidro</i>	<i>Indicador</i>
GWP	1.97E-02 85%	3.57E-03 15%	kg CO ₂ eq.
AP	6.93E-05 75%	2.32E-05 25%	kg SO ₂ eq.
EP	2.25E-06 75%	7.63E-07 25%	kg N eq.
ODP	-8.76E-16 68%	-4.17E-16 32%	kg CFC 11 eq.
Ecotoxicidade	5.05E-04 85%	8.96E-05 15%	CTUe
Toxicidade humana	9.88E-06 85%	1.77E-06 15%	kg PM _{2.5} eq.
Recursos, comb. fósseis	2.05E-02 80%	5.17E-03 20%	MJ
Poluição (smog)	8.28E-04 83%	1.74E-04 17%	kg O ₃ eq.

fonte: (Próprio Autor)

Figura 16 – Plote comparativo dos resultados da fôrma da bobina em percentil.



fonte: (Próprio Autor)

Para a fôrma da bobina, o processo de extração da bauxita passa pelo mesmo procedimento descrito na produção da bobina de alumínio, diferenciando na etapa final em que se formam as chapas/folhas de alumínio e não tarugo como o destinado a bobina. As categorias de impacto para a fibra de vidro foram melhores que a de alumínio. Seu processo de fabricação apresenta processos mais simplificados

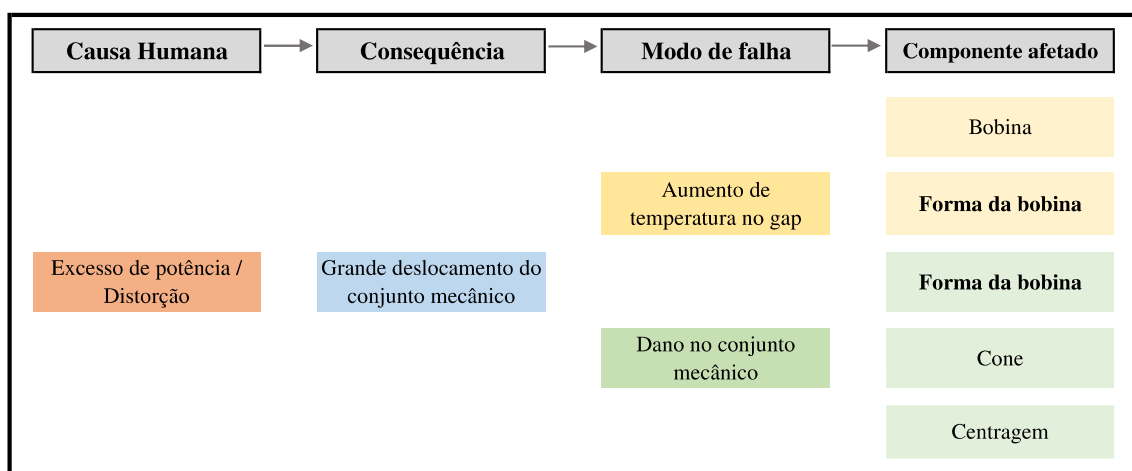
que do alumínio, utilizando minerais em sua composição e menor número de maquinário necessário. No caso dos minerais podemos ver no inventário no Apêndice A, a presença de minério de Colemanita ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) e Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). O valor da depleção da camada de O_3 para ambos os materiais foram negativos, este valor representa que o sistema analisado resultou positivamente para a categoria de impacto, e encontrar a causa raiz desta discrepância não faz parte do escopo do estudo, mas, pode ser indicado para um futuro estudo aprofundado. A utilização de fibra de vidro em alto-falantes se torna interessante tanto no âmbito ambiental quanto no desempenho, visto que a fibra de vidro possui uma rigidez e temperatura de operação (antes de deformar) melhores que o alumínio.

4.8 CENÁRIOS ABORDADOS

4.8.1 Reparo para alto-falante

A reparabilidade do produto pode reduzir as emissões gerais do ciclo de vida. Uma vez que, reparado é introduzido novamente a fase de uso, estendendo sua vida útil. No produto analisado, a invalidez mais comum se dá pela queima da bobina devido a altas temperaturas. A opção de menor custo é a troca apenas do conjunto bobina-fôrma pois os demais componentes não são afetados na maioria dos casos como mostrado na [Figura 17](#).

Figura 17 – Diagrama de falha de alto-falante



fonte: (Próprio Autor)

Neste cenário, a fabricação apenas do conjunto bobina-fôrma que compõe a parte mais afetada nos defeitos decorrentes da fase de uso se torna uma das soluções positivas para a diminuição na categoria de esgotamento de recursos já que o produto não será totalmente descartado prematuramente.

4.8.2 Modularidade da impedância

A modularidade do produto para que se torne mais versátil e funcional para diversos projetos também impacta na diminuição de esgotamento de recursos. É possível a realização de múltiplas sobreposições no enrolamento da bobina e desta forma a repartição para múltiplas saídas com diversas impedâncias gerando novas associações, a fim de conseguir a impedância desejável e ter a máxima

eficiência do alto-falante. Em relação aos impactos gerados pela adição de novos enrolamentos e consequentemente mais materiais, seria pequeno visto que o processo de fabricação da bobina com mais enrolamentos afetaria apenas o tempo da fabricação, e no processo de extração do material teria impacto proporcional a quantidade de matéria extraída.

4.8.3 Conscientização de reciclagem de materiais em alto-falantes

Um alto-falante de alto desempenho necessita de materiais de alta qualidade e um refinamento e complexidade maior na sua produção se comparado com um de baixo desempenho/baixo custo. Neste cenário, vale ressaltar que o Nd (ímã utilizado nos de alto-desempenho) possui extração e produção primária concentrada na China desde 1994, com a demanda por suas aplicações aumentando desde 1990 tanto para o material virgem como o reciclado. O uso de ímãs de Nd em alto-falantes no mercado global, assume a parcela de 6.2%, como comparação a maior parcela fica para motores elétricos com 34% [25]. Desta forma, a conscientização dos consumidores que o produto embarca materiais de alta qualidade (raros como o Nd) se torna uma abordagem de baixo custo e de grande impacto se mensurar as reduções do descarte incorreto. Como solução mercadológica, a correção e abordagens de marketing (como novas linhas de alto-falantes com esse enfoque) sanaria a falta de entendimento e da forma como o produto é apresentado para o consumidor final.

5 CONCLUSÕES

Com a interpretação dos resultados e dos cenários abordados, foi possível identificar algumas melhorias tanto no âmbito conceitual, na produção de alto-falantes, quanto mercadológico para a expansão do conhecimento, conscientização e possibilidade de utilização de materiais menos agressivos ao meio ambiente e ao mesmo tempo eficientes no desempenho. Algumas limitações de materiais foram contornadas ao decorrer deste estudo, como a quantificação da massa dos materiais utilizando o *datasheet* do alto-falante. As limitações regionais ao mesmo tempo que reduzem as possibilidades da modelagem, incentivam a realizar novos estudos e novas pesquisas para cada região e cada país, visto que as etapas de produção de um determinado produto na China por exemplo, pode ser completamente diferente para o Brasil. Os impactos gerados também são completamente diferentes e suas consequências para países vizinhos também. Desta forma o fomento para expandir esse banco de dados internacionalmente é fundamental, e uma das grandes barreiras encontradas para o crescimento é o receio das empresas no fornecimento detalhado de seus materiais e etapas de produção. A medida que novos processos e novos materiais são fornecidos e atribuídos ao escopo, a complexidade do sistema e a pulverização de dados que são gerados em todas as categorias de impacto aumentam o grau de assertividade, e consequentemente a segurança dos dados obtidos gerando novas possibilidades de soluções e a criação de novos cenários para serem aplicado a determinadas fases da produção. Para projeções futuras deste estudo, um novo escopo será definido visando a análise de novos componentes do alto-falante, e a inserção detalhada dos demais processos de fabricação aprofundando a ferramenta de avaliação para as demais áreas da engenharia, visando fechar o triângulo custo, desempenho técnico e desempenho ambiental para os demais setores da indústria brasileira.

6 REFERÊNCIAS

1. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
2. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.
3. ADIBI, N., J., **New resource assessment characterization factors for rare earth elements: applied in NdFeB permanent magnet case study**. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019.
4. AHBE, S.; BRAUNSCHWEIG, A., **Methodology for ecobalances based on ecological optimization**. Bern, 1990.
5. ALTHAUS, H. J.; CHUDACOFF, **Life cycle inventories of chemicals: data v2.0**, Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent Report No. 8, 2007.
6. BARBIERI; CARLOS, J., **Gestão Ambiental Empresarial**. 2ª ed. São Paulo, Saraiva, 2007.
7. BARE, J. C.; NORRIS, G. A.; PENNINGTON, D. W. & MCKONE; T. E., **TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts**. Journal of Industrial Ecology, 2003.
8. BORWICK J., **Loudspeaker and Headphone Handbook**, Taylor & Francis, 2001.
9. BUTTON, D., **Magnetic Circuit Design Methodology for Dual-Coil Transducers**, J. Audio Engineering Society, Volume 50, Number 6, 2002.
10. CHEN, B.; YANG, J.X.; OUYANG, Z.Y., **Life Cycle Assessment of Internal Recycling Options of Steel Slag in Chinese Iron and Steel Industry**. Journal of Iron and Steel Research, International, 2001.
11. CHOPRA, S.; MEINDL, P., **Gerenciamento da cadeia de suprimento**. São Paulo, Prentice Hall, 2003.
12. CLAEYS, C.; LEONELLI, D., **Fabrication and characterization of Si and hetero-junction tunnel field effect transistors**. Tóquio, 2009.
13. CUBALA, A.B.; PURVIS, M.R.I., **A methodology for life cycle and sustainability analysis of manufacturing processes**. Journal of Cleaner Production, 1999.
14. EARGLE, J., **The Loudspeaker Handbook**. Kluwer Academic Press, 2003.
15. Fairphone, **Examining the Fairphone's environmental impact**, 2015.
16. GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R., **Industrial ecology**. New Jersey, Prentice Hall, 1995.

17. GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R., **Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards**. Dordrecht, 2002.
18. HONGYUE J.; PETER A.; TIMOTHY M., **Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets**. 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 2016.
19. JBL Technical Note Volume 3 Number 2A, **JBL's New LSR6300 Series Studio Monitors**, JBL Professional. Northridge, CA, 2004.
20. MICAH B., **Neodymium and the global headphone market**, Ritsumeikan Asia Pacific University, Japan, 2015.
21. NAVARRO, J.; ZHAO, F.; JOHN S., **Comparative LCA of NdFeB and ferrite motors used in the microfabrication industry**. Honolulu, U.S.A, 2014.
22. STEEN, B., **A systematic approach to environmental priority strategies in product development**, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1999.
23. WESLEY, D., C., **Mapping stocks and flows of neodymium**, Department of Industrial Ecology, Leiden University, Netherlands, 2016.
24. WONELAN M., SMALL, D., **Loudspeaker Bonding Technology**, Henkel Industries Düsseldorf, Germany, 2017.
25. YONGXIANG, Y.; WALTON, A; **REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap**, Journal of Sustainable Metallurgy, 2017.

APÊNDICE A – INVENTÁRIO DOS MATERIAIS

Tabela 8 – Inventário da bobina de alumínio.

Entradas		Saídas	
Recursos		Recursos	
<i>Energéticos não renováveis</i>		<i>Materiais depositados</i>	
Petróleo	26.4 kJ	<i>Estoque</i>	
Carvão mineral	56.2 kJ	Sobrecarga	397 g
Gás natural	29 kJ	Deteriorado	15.6 g
<i>Materiais</i>		Rejeitos	2.04 g
<i>Não renováveis (elementos)</i>		Resíduo tratável	0.0076 g
Ferro	0.567 g	Sobras	87.9 g
<i>Não renováveis</i>		<i>Emissões p/ ar</i>	
Bauxita	224 g	<i>Partículas</i>	4.3E-07 g
Minério de cromo (39%)	0.151 g	<i>Metais pesados</i>	3.68E-04 g
Fluorita CaF ₂	1.41 g	<i>Inorgânicas</i>	
Rocha inerte	442 g	Dióxido de carbono	332 g
Calcário	10.5 g	Monóxido de carbono	0.138 g
Potássio (sal, 10% K ₂ O)	0.151 g	Nitrogênio	0.201 g
Areia de quartzo (sílica)	2.6 g	Óxido de nitrogênio	0.613 g
Cloreto de sódio	5.04 g	Dióxido de enxofre	0.853 g
Solo	16.6 g	<i>Orgânicas (VOC)</i>	
Argila	3.7 g	Metano	0.727 g
<i>Renováveis</i>		NM VOC	0.0699 g
Água	387.5 g	<i>Emissões p/ água</i>	221 kg
Ar	1.4 kg	<i>Emissões p/ solo</i>	1.23E-03 g
Dióxido de carbono	4.82 g	Produto	
		Bobina de alumínio	40.7 g

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 9 – Inventário da bobina de cobre.

Entradas		Saídas	
Recursos		Recursos	
<i>Energéticos não renováveis</i>		<i>Materiais depositados</i>	
Petróleo	21.8 kJ	<i>Estoque</i>	
Carvão mineral	12.6 kJ	Sobrecarga	8.19 kg
Gás natural	7.72 kJ	Deteriorado	2.51 g
<i>Materiais</i>		Rejeitos	4.46 kg
<i>Não renovável (elementos)</i>		Resíduo tratável	0.0076 g
Cobre	598 g	Sobras	86.8 g
Chumbo	3 g	<i>Emissões p/ ar</i>	
Ferro	0.155 g	<i>Partículas</i>	0.0607 g
Zinco	17.5 g	<i>Metais pesados</i>	0.0246 g
<i>Não renováveis</i>		<i>Inorgânicas</i>	
Minério de cromo (39%)	0.151 g	Dióxido de carbono	149 g
Fluorita CaF ₂	0.267 g	Monóxido de carbono	0.12 g
Rocha inerte	12.2 kg	Nitrogênio	0.182 g
Calcário	5.79 g	Óxido de nitrogênio	0.357 g
Potássio (sal, 10% K ₂ O)	0.306 g	Dióxido de enxofre	0.734 g
Areia de quartzo (sílica)	10.9 g	<i>Orgânicas (VOC)</i>	
Cloreto de sódio	0.938 g	Metano	0.192 g
Solo	6.06 g	<i>NMVOC</i>	0.0344 g
Argila	3.63 g	<i>Emissões p/ água</i>	145 kg
<i>Renováveis</i>		<i>Emissões p/ solo</i>	1.13E-03 g
Água	147 kg	Produto	
Ar	903 g	Bobina de cobre	40.7 g
Dióxido de carbono	7.9 g		

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 10 – Inventário da fôrma de alumínio.

Entradas		Saídas	
Recursos		Recursos	
<i>Energéticos não renováveis</i>		<i>Materiais depositados</i>	
Petróleo	1.37 kJ	<i>Estoque</i>	
Carvão mineral	2.69 kJ	Sobrecarga	24 g
Gás natural	1.68 kJ	Deteriorado	0.802 g
<i>Materiais</i>		Rejeitos	0.111 g
<i>Não renováveis (elementos)</i>		Sobras	4.53 g
Ferro	0.0317 g	<i>Emissões p/ ar</i>	
<i>Não renováveis</i>		<i>Partículas</i>	7.78E-03 g
Bauxita	11.4 g	<i>Metais pesados</i>	1.87E-05 g
Rocha inerte	26.8 g	<i>Inorgânicas</i>	
Calcário	0.552 g	Dióxido de carbono	17.9 g
Potássio (sal, 10% K2O)	0.0118 g	Monóxido de carbono	7.17E-03 g
Areia de quartzo (sílica)	0.135 g	Nitrogênio	1.66E-03 g
Cloreto de sódio	0.238 g	Óxido de nitrogênio	0.0326 g
Solo	0.852 g	Dióxido de enxofre	0.0435 g
Argila	0.191 g	<i>Orgânicas (VOC)</i>	
<i>Renováveis</i>		Metano	0.039 g
Água	184 kg	<i>NM VOC</i>	3.78E-03 g
Ar	77.5 g	<i>Emissões p/ água</i>	185 kg
Dióxido de carbono	0.393 g	<i>Emissões p/ solo</i>	2.792E-05 g
		Produto	
		Fôrma de alumínio	2.07 g

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 11 – Inventário da fôrma de fibra de vidro.

Entradas		Saídas	
Recursos		Recursos	
<i>Energéticos não renováveis</i>		<i>Materiais depositados</i>	
Petróleo	0.0618 kJ	<i>Estoque</i>	
Carvão mineral	0.202 kJ	Sobrecarga	10.3 g
Gás natural	0.714 kJ	Deteriorado	0.027 g
<i>Materiais</i>		Rejeitos	0.14 g
<i>Não renováveis (elementos)</i>		Sobras	0.446 g
Ferro	4.18E-03 g	<i>Emissões p/ ar</i>	
<i>Não renováveis</i>		<i>Partículas</i>	9.73E-04 g
Minério de colemanita	0.273 g	<i>Metais pesados</i>	1.99E-06 g
Dolomita CaMg2CO3	0.179 g	<i>Inorgânicas</i>	
Rocha inerte	11.2 g	Dióxido de carbono	3.39 g
Calcário	0.856 g	Monóxido de carbono	1.25E-03 g
Potássio (sal, 10% K2O)	0.011 g	Nitrogênio	3.77E-04 g
Areia de quartzo (sílica)	0.844 g	Óxido de nitrogênio	2.28E-03 g
Solo	0.867 g	Dióxido de enxofre	0.0163 g
Argila	0.0185 g	<i>Orgânicas (VOC)</i>	
<i>Renováveis</i>		Metano	5.75E-03 g
Água	3.89 kg	<i>NMVOC</i>	1.09E-03 g
Ar	13.9 g	<i>Emissões p/ água</i>	3.97 kg
Dióxido de carbono	0.346 g	<i>Emissões p/ solo</i>	2.066E-05 g
		Produto	
		Fôrma de fibra de vidro	2.07 g

fonte: (Próprio Autor)

APÊNDICE B – RESULTADOS METODOLÓGICOS DAS BOBINAS

Tabela 12 – Resultados CML 2001 das bobinas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Copper
GWP 100 YEARS	Global Warming Potential	kg CO2-Equiv.	3.67E-01	1.57E-01
AP	Acidification Potential	kg SO2-Equiv.	1.38E-03	1.09E-03
EP	Eutrophication Potential	kg Phosphate-Equiv.	9.22E-05	6.71E-05
ODP	Ozone Layer Depletion Potential	kg R11-Equiv.	5.07E-09	5.07E-09
ADP	Abiotic Depletion elements	kg Sb-Equiv.	1.47E-07	1.68E-04
ADP fossil	Abiotic Depletion fossil	MJ	4.03E+00	1.79E+00
FAETP inf.	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	kg DCB-Equiv.	2.31E-03	6.61E-03
HTP inf.	Human Toxicity Potential	kg DCB-Equiv.	1.34E+00	1.41E-01
MAETP inf.	Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	kg DCB-Equiv.	6.42E+02	9.13E+01
POCP	Photochem Ozone Creation Potential	kg Ethene-Equiv.	7.81E-05	5.91E-05
TETP inf.	Terrestrial Ecotoxicity Potential	kg DCB-Equiv.	6.19E-04	7.80E-04
GWP, excl biogenic carbon	Global Warming Potential, excl biogenic carbon	kg CO2-Equiv.	3.68E-01	1.58E-01
GWP 100, excl bio. C, incl LUC	Global Warming Potential (GWP 100), excl bio.	kg CO2-Equiv.	3.68E-01	1.58E-01
GWP 100, incl bio. C, incl LUC	Global Warming Potential (GWP 100), incl bio.	kg CO2-Equiv.	3.67E-01	1.57E-01
GWP 100, Land Use Change only	Global Warming Potential (GWP 100), Land Use	kg CO2-Equiv.	1.05E-04	4.80E-04

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 13 – Resultados Environmental Footprint 2.0 das bobinas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Copper
AP	Acidification	Mole of H+ eq.	1.59E-03	1.24E-03
Human toxicity (cancer)	Cancer human health effects	CTUh	8.20E-10	1.57E-09
GWP	Climate change	kg CO2 eq.	3.72E-01	1.61E-01
GWP (biogenic)	Climate change (biogenic)	kg CO2 eq.	1.18E-04	1.05E-04
GWP (fossil)	Climate change (fossil)	kg CO2 eq.	3.73E-01	1.60E-01
GWP (land use)	Climate Change (land use change)	kg CO2 eq.	1.05E-04	4.80E-04
EP freshwater	Eutrophication freshwater	kg P eq.	1.35E-07	3.08E-07
EP marine	Eutrophication marine	kg N eq.	2.47E-04	1.50E-04
EP	Eutrophication terrestrial	Mole of N eq.	2.69E-03	1.60E-03
Ionising radiation	Ionising radiation - human health	kBq U235 eq.	8.41E-02	2.83E-03
Land use	Land use	Pt.	3.04E-01	3.37E+00
Human toxicity (non cancer)	Non-cancer human health effects	CTUh	1.68E-08	1.89E-07
ODP	Ozone Depletion	kg CFC-11 eq.	2.43E-09	2.43E-09
POCP	Photochemical Ozone Formation	kg NMVOC Equiv.	7.46E-04	4.54E-04
Energy	Resource use energy carriers	MJ	5.08E+00	1.81E+00
Minerals & metals	Resource use mineral and metals	kg Sb eq.	3.33E-08	1.68E-04
Respiratory inorganics	Respiratory inorganics	PM2.5 eq.	1.31E-08	1.29E-08
Eco tox	Ecotoxicity freshwater	CTUe	2.39E-02	5.17E-01
Water	Water scarcity	m3 eq.	2.31E-02	1.27E-01

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 14 – Resultados ReCiPe 2019 v1.1 das bobinas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Copper
Climate change	Climate change	kg CO2 eq.	3.75E-01	1.60E-01
Terrestrial acidification	Climate change, incl biogenic carbon	kg CO2 eq.	3.75E-01	1.59E-01
Freshwater eutrophication	Fine Particulate Matter Formation	kg PM2.5 eq.	3.38E-04	2.80E-04
Ozone depletion	Fossil depletion	kg oil eq.	1.17E-01	4.37E-02
Fossil depletion	Freshwater Consumption	m3	3.35E-03	2.57E-03
Freshwater ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	2.77E-05	5.69E-04
Human toxicity	Freshwater Eutrophication	kg P eq.	1.34E-07	3.08E-07
Ionising radiation	Human toxicity, cancer	kg 1,4-DB eq.	2.27E-04	1.86E-04
Marine ecotoxicity	Human toxicity, non-cancer	kg 1,4-DB eq.	1.03E-02	2.29E-01
Marine eutrophication	Ionizing Radiation	Bq. C-60 eq. to air	1.15E-02	5.04E-04
Metal depletion	Land use	Annual crop eq. yr	2.66E-03	2.55E-01
Natural land transformation	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	1.36E-04	7.46E-03
Particulate matter formation	Marine Eutrophication	kg N eq.	1.78E-06	2.73E-06
Photochemical oxidant formation	Metal depletion	kg Cu eq.	1.59E-03	7.20E-02
Terrestrial ecotoxicity	Photochemical Ozone Formation, Ecosystem	kg NOx eq.	6.36E-04	3.74E-04
Water depletion	Photochemical Ozone Formation, Human Health	kg NOx eq.	6.32E-04	3.72E-04
Stratospheric Ozone Depletion	Stratospheric Ozone Depletion	kg CFC-11 eq.	7.32E-08	1.53E-07
Terrestrial Acidification	Terrestrial Acidification	kg SO2 eq.	1.08E-03	8.72E-04
Terrestrial ecotoxicity	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	8.30E-02	1.49E+01

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 15 – Resultados TRACI 2.1 das bobinas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Copper
GWP	Global Warming Air, incl. biogenic carbon	kg CO2 eq.	3.67E-01	1.57E-01
AP	Acidification	kg SO2 eq.	1.34E-03	1.03E-03
EP	Eutrophication	kg N eq.	4.09E-05	3.90E-05
ODP	Ozone Depletion Air	kg CFC 11 eq.	2.55E-09	2.55E-09
Ecotox Air	Ecotoxicity	CTUe	9.71E-03	4.95E-01
Human Health Particulate Air	Human Health Particulate Air	kg PM2.5 eq.	1.92E-04	9.81E-05
Human toxicity, cancer	Human toxicity, cancer	CTUh	1.99E-10	3.23E-10
Human toxicity, non-canc.	Human toxicity, non-canc.	CTUh	1.68E-08	1.89E-07
Resources, Fossil fuels	Resources, Fossil fuels	MJ surplus energy	3.81E-01	1.99E-01
Smog Air	Smog Air	kg O3 eq.	1.56E-02	9.14E-03
Global Warming Air	Global Warming Air, excl. biogenic carbon	kg CO2 eq.	3.67E-01	1.58E-01

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 16 – Resultados CML 2001 das fôrmas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Fiberglass
GWP 100 YEARS	Global Warming Potential	kg CO2-Equiv.	1.97E-02	3.59E-03
AP	Acidification Potential	kg SO2-Equiv.	7.09E-05	2.46E-05
EP	Eutrophication Potential	kg Phosphate-Equiv.	4.94E-06	1.38E-06
ODP	Ozone Layer Depletion Potential	kg R11-Equiv.	8.26E-17	6.40E-17
ADP	Abiotic Depletion elements	kg Sb-Equiv.	6.20E-09	1.88E-07
ADP fossil	Abiotic Depletion fossil	MJ	2.17E-01	4.61E-02
FAETP inf.	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	kg DCB-Equiv.	1.17E-04	5.87E-06
HTP inf.	Human Toxicity Potential	kg DCB-Equiv.	6.85E-02	2.07E-04
MAETP inf.	Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	kg DCB-Equiv.	3.28E+01	1.86E-01
POCP	Photochem Ozone Creation Potential	kg Ethene-Equiv.	3.99E-06	1.14E-06
TETP inf.	Terrestrial Ecotoxicity Potential	kg DCB-Equiv.	3.17E-05	5.26E-06
GWP, excl biogenic carbon	Global Warming Potential, excl biogenic carbon	kg CO2-Equiv.	1.97E-02	3.58E-03
GWP 100, excl bio. C, incl LUC	Global Warming Potential (GWP 100), excl bio.	kg CO2-Equiv.	1.97E-02	3.58E-03
GWP 100, incl bio. C, incl LUC	Global Warming Potential (GWP 100), incl bio.	kg CO2-Equiv.	1.97E-02	3.59E-03
GWP 100, Land Use Change only	Global Warming Potential (GWP 100), Land Use	kg CO2-Equiv.	6.39E-06	4.03E-06

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 17 – Resultados Environmental Footprint 2.0 das fôrmas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Fiberglass
AP	Acidification	Mole of H+ eq.	8.20E-05	2.83E-05
Human toxicity (cancer)	Cancer human health effects	CTUh	4.29E-11	5.82E-12
GWP	Climate change	kg CO2 eq.	2.00E-02	3.64E-03
GWP (biogenic)	Climate change (biogenic)	kg CO2 eq.	1.12E-05	1.22E-05
GWP (fossil)	Climate change (fossil)	kg CO2 eq.	2.00E-02	3.63E-03
GWP (land use)	Climate Change (land use change)	kg CO2 eq.	6.39E-06	4.03E-06
EP freshwater	Eutrophication freshwater	kg P eq.	9.53E-09	8.95E-09
EP marine	Eutrophication marine	kg N eq.	1.32E-05	3.65E-06
EP	Eutrophication terrestrial	Mole of N eq.	1.44E-04	3.95E-05
Ionising radiation	Ionising radiation - human health	kBq U235 eq.	4.37E-03	1.82E-04
Land use	Land use	Pt.	3.29E-02	2.17E-02
Human toxicity (non cancer)	Non-cancer human health effects	CTUh	8.75E-10	1.63E-10
ODP	Ozone Depletion	kg CFC-11 eq.	6.22E-17	4.85E-17
POCP	Photochemical Ozone Formation	kg NMVOC Equiv.	3.96E-05	1.13E-05
Energy	Resource use energy carriers	MJ	2.72E-01	5.08E-02
Minerals & metals	Resource use mineral and metals	kg Sb eq.	2.07E-09	1.13E-09
Respiratory inorganics	Respiratory inorganics	PM2.5 eq.	6.63E-10	1.75E-10
Eco tox	Ecotoxicity freshwater	CTUe	1.21E-03	1.40E-04
Water	Water scarcity	m3 eq.	1.08E-03	4.35E-04

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 18 – Resultados ReCiPe 2019 v1.1 das fôrmas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Fiberglass
Climate change	Climate change	kg CO2 eq.	2.01E-02	3.63E-03
Terrestrial acidification	Climate change, incl biogenic carbon	kg CO2 eq.	2.01E-02	3.64E-03
Freshwater eutrophication	Fine Particulate Matter Formation	kg PM2.5 eq.	1.74E-05	5.87E-06
Ozone depletion	Fossil depletion	kg oil eq.	6.30E-03	1.21E-03
Fossil depletion	Freshwater Consumption	m3	1.69E-04	1.26E-05
Freshwater ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	1.44E-06	2.55E-07
Human toxicity	Freshwater Eutrophication	kg P eq.	9.53E-09	8.95E-09
Ionising radiation	Human toxicity, cancer	kg 1,4-DB eq.	1.18E-05	7.81E-07
Marine ecotoxicity	Human toxicity, non-cancer	kg 1,4-DB eq.	5.39E-04	5.93E-05
Marine eutrophication	Ionizing Radiation	Bq. C-60 eq. to air	6.01E-04	3.06E-05
Metal depletion	Land use	Annual crop eq. yr	2.09E-04	1.23E-04
Natural land transformation	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	6.94E-06	7.35E-07
Particulate matter formation	Marine Eutrophication	kg N eq.	1.07E-07	5.34E-08
Photochemical oxidant formation	Metal depletion	kg Cu eq.	8.20E-05	1.24E-04
Terrestrial ecotoxicity	Photochemical Ozone Formation, Ecosystem	kg NOx eq.	3.39E-05	9.38E-06
Water depletion	Photochemical Ozone Formation, Human Health	kg NOx eq.	3.37E-05	9.28E-06
Stratospheric Ozone Depletion	Stratospheric Ozone Depletion	kg CFC-11 eq.	3.79E-09	8.61E-10
Terrestrial Acidification	Terrestrial Acidification	kg SO2 eq.	5.58E-05	1.97E-05
Terrestrial ecotoxicity	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	4.34E-03	8.23E-04

fonte: (Próprio Autor)

Tabela 19 – Resultados TRACI 2.1 das fôrmas.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>unit</i>	Aluminium	Fiberglass
GWP	Global Warming Air, incl. biogenic carbon	kg CO2 eq.	1.97E-02	3.57E-03
AP	Acidification	kg SO2 eq.	6.93E-05	2.32E-05
EP	Eutrophication	kg N eq.	2.25E-06	7.63E-07
ODP	Ozone Depletion Air	kg CFC 11 eq.	-8.76E-16	-4.17E-16
Ecotox Air	Ecotoxicity	CTUe	5.05E-04	8.96E-05
Human Health Particulate Air	Human Health Particulate Air	kg PM2.5 eq.	9.88E-06	1.77E-06
Human toxicity, cancer	Human toxicity, cancer	CTUh	1.03E-11	1.81E-12
Human toxicity, non-canc.	Human toxicity, non-canc.	CTUh	8.74E-10	1.63E-10
Resources, Fossil fuels	Resources, Fossil fuels	MJ surplus energy	2.05E-02	5.17E-03
Smog Air	Smog Air	kg O3 eq.	8.28E-04	1.74E-04
Global Warming Air	Global Warming Air, excl. biogenic carbon	kg CO2 eq.	1.97E-02	3.56E-03

fonte: (Próprio Autor)

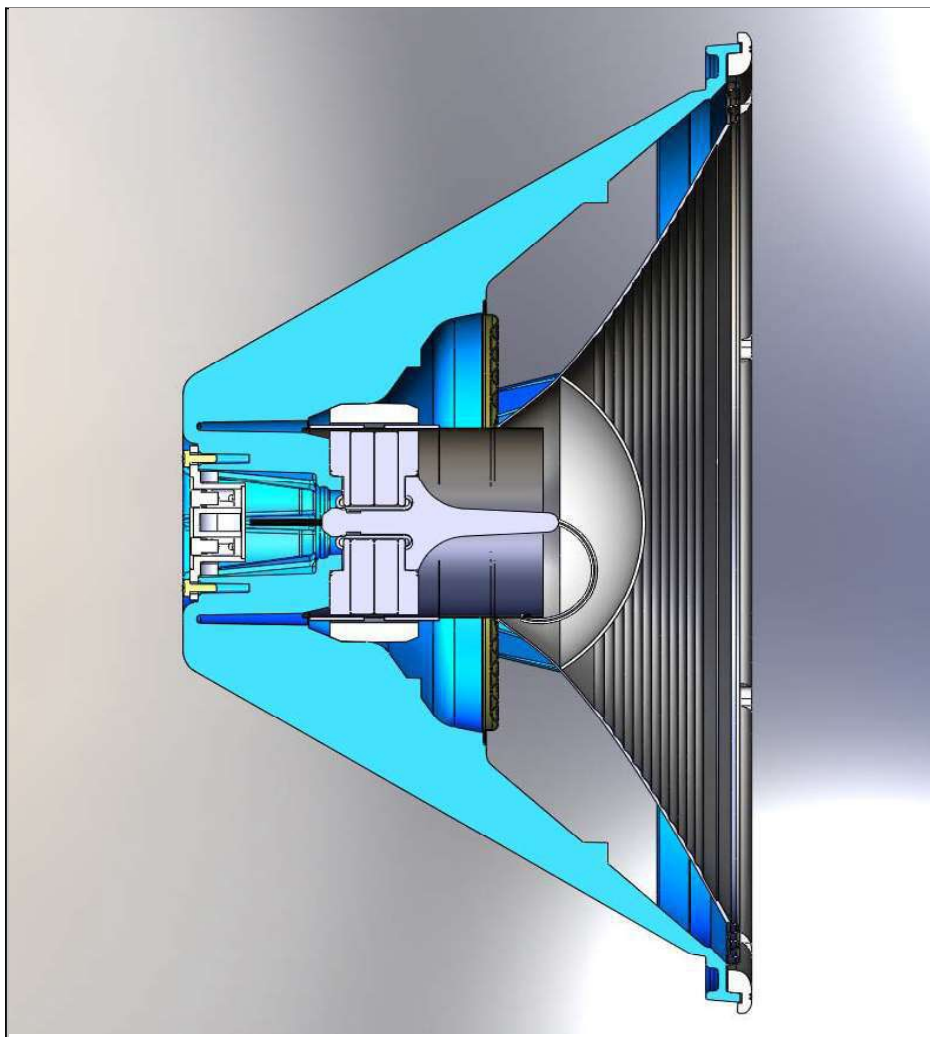
ANEXO A – DATASHEET DO ALTO-FALANTE JBL2216ND E JBL15CV5

Tabela 20 – Datasheet parcial do modelo JBL2216Nd.

Voice Coil			
I.D.:	3 inch - dual coil	Max. O.D.:	3,120 inches
Wire Type:	5056 Aluminum Ribbon (Edge) wound	Wire Size:	0.048 x 0.011989 inch (bare)
Wire Turns:	64 each coil	Wire D.C.R.:	5.00 Ohms (series connected total)
Winding Width:	0.800 inch each coil @ .30 inch apart	Winding layers:	1 layer
Former:	High-Temp 0.18mm FQG Fiberglass	Wrapper:	High-Temp 0.13mm NEC - 2 layers
Other:	Coils internally connected in Series, Perforations 10x @ 0.25 inch Dia.		
Magnet			
Material:	Neodymium 33MGOe - SH grade	Thickness:	0.350 inch
O.D.:	2.910 inch	I.D.:	0.535 inch
Other:	Finish: Zinc Electroplate with Electrolytically applied Epoxy paint		

Section View

Model #	2216Nd	Part #	320-0045-001
---------	--------	--------	--------------



fonte: (Adaptado de JBL PRO/Spec Sheets, 2019)

Tabela 21 – Datasheet parcial do modelo JBL15CV5.

PARÂMETROS ADICIONAIS

βL:	7.0	Tm
Densidade de fluxo no gap:	0.87	T
Diâmetro da bobina:	46	mm
Comprimento do fio da bobina:	13.0	m
Coefficiente de temperatura do fio (α25):	0.00382	1/°C
Temperatura máxima da bobina:	262	°C
θvc (temperatura máx. da bobina/potência máx.):	3.36	°C/W
Hvc (altura do enrolamento da bobina):	12	mm
Hag (altura do gap):	8.0	mm
Re (resistência da bobina):	5.2	Ω
Mms (massa móvel):	72.6	g
Cms (complância mecânica):	110	µm/N
Rms (resistência mecânica da suspensão):	2.35	kg/s

PARÂMETROS NÃO-LINEARES

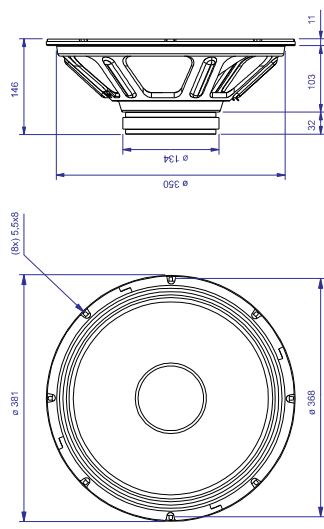
Le @ Fs (indutância da bobina na ressonância):	2.482	mH
Le @ 1 kHz (indutância da bobina em 1 kHz):	0.793	mH
Le @ 20 kHz (indutância da bobina em 20 kHz):	0.242	mH
Red @ Fs (resistência de perdas na ressonância):	0.32	Ω
Red @ 1 kHz (resistência de perdas em 1 kHz):	3.22	Ω
Red @ 20 kHz (resistência de perdas em 20 kHz):	35.68	Ω
Krm (coeficiente da resistência de perdas):	2.87	mΩ
Kxm (coeficiente da indutância da bobina):	25.30	mH
Ern (expoente da resistência de perdas da bobina):	0.803	
Exm (expoente da indutância da bobina):	0.604	

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Material do ímã:	Ferrite de bário	
Peso do ímã:	920	g
Diâmetro x altura do ímã:	134 x 18 mm	
Peso do conjunto magnético:	2600	g
Material da carcaça:	Chapa de Aço	
Acabamento da carcaça:	Pintura epoxi, cor preta	
Material do fio da bobina:	Cobre	
Material da forma da bobina:	Poliimida (Kapton®)	
Material do cone:	Celulose fibra longa	
Volume ocupado pelo falante:	4,5 l	
Peso líquido do falante:	3300	g
Peso total (incluindo embalagem):	4080	g
Dimensões da embalagem (C x L x A):	39,3 x 39,3 x 17,2 cm	

INFORMAÇÕES PARA MONTAGEM

Número de furos de fixação:	8	
Diâmetro dos furos de fixação:	5,5x8	mm
Diâmetro do círculo dos furos de fixação:	368	mm
Diâmetro do corte para montagem frontal:	352	mm
Diâmetro do corte para montagem traseira:	348	mm
Tipo do conector:	Soldável	
Polaridade:	Tensão + no borne vermelho; deslocamento p/ frente	
Distância mín. entre parede da caixa e a traseira do falante	75	mm



The technical drawing shows the JBL15CV5 speaker from two perspectives. The top view (front) is a circle with an outer diameter of 368 mm and an inner diameter of 352 mm. It features eight mounting holes arranged in a circle with a diameter of 368 mm. The side view shows the speaker's profile with a total height of 146 mm. The mounting flange has a thickness of 11 mm and a diameter of 103 mm. The central cone has a diameter of 134 mm. The drawing also indicates a mounting hole diameter of 5.5x8 mm.

fonte: (Adaptado de JBL PRO/Spec Sheets, 2019)

ANEXO B – DENSIDADE E MATERIAIS DOS ALTO-FALANTES

Tabela 22 – Catálogo de alto-falante e materiais do modelo JBL15CV5.

Revisão: 09/10/03	Parâmetros	SELENIUM PRO - WALL CHART - Falantes 8 Ohms															
		Woofers 8 Ohms								Alto-falantes 8 Ohms							
		Sub Woofers 8 Ohms				Alumínio Injetado				Aço Estampado				Aço Estampado			
		18"	18SW2P	15"	15SWIP	18"	18SWIP	15"	15SWIP	18"	18SWIP	15"	15SWIP	12"	12CV3	10"	8"
	Modelo	18SWIP	18SW2P	15SWIP	15SWIP	18SWIP	18SWIP	15SWIP	15SWIP	18SWIP	18SWIP	15SWIP	15SWIP	12CV3	12CV3	10PW3	8PW3
Polância RMS (W)		800	600	800	800	450	500	450	500	450	500	450	500	250	200	300	150
Impedância (Ω)		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
SPL 1 W @ 1m		97	95	96	96	98	96	97	96	95	95	95	95	98	97	96	98
Resp.Frequência @ -10 dB		30 a 2500	38 a 1000	30 a 2500	30 a 2500	35 a 3000	45 a 3500	40 a 3500	45 a 3500	45 a 4000	45 a 4000	45 a 3000	40 a 4000	55 a 5000	70 a 5000	60 a 6000	70 a 8000
Comp. Polância @ -0 dB		3.3	3.2	3.5	3.5	3.0	3.0	2.5	3.9	4.7	4.5	4.7	4.1	3.0	4.7	2.8	3.8
Comp. Polância @ -3 dB		2.8	2.5	2.8	2.8	2.2	2.0	1.7	2.8	3.2	3.3	3.2	2.5	1.9	2.5	1.5	2.7
Comp. Polância @ -10 dB		0.7	1.1	0.8	0.8	0.7	0.1	0.1	1.0	1.4	1.4	1.4	0.6	0.6	0.9	0.5	0.3
Fs (Hz)		37	36	40	40	34	35	36	35	46	46	46	37	40	50	42	65
Vas (Litros)		232	179	170	170	316	265	163	170	57	52	52	274	190	154	108	59
Qts		0.44	0.42	0.35	0.35	0.45	0.43	0.39	0.33	0.33	0.33	0.35	0.61	0.40	1.2	0.60	0.89
Qes		0.46	0.43	0.36	0.36	0.46	0.43	0.40	0.33	0.34	0.34	0.36	0.68	0.41	1.34	0.75	0.97
Qms		11.45	16.12	12.34	12.34	13.43	28.13	14.7	27.07	11.92	21.84	7.93	5.81	16.82	11.26	7.95	16.33
BL (Tm)		21	25.4	21.5	21.5	20.7	22.5	20.5	22.1	20.3	21.1	19.4	12.3	17.0	9.9	9.9	15.5
R _e (Ω)		5.5	5.6	5.5	5.5	6.7	6.4	6.7	6.5	6.7	6.6	6.3	6.3	5.5	6.4	6.3	6.3
Mms (g)		160.8	217.7	121.0	121.0	140.0	157.2	108.7	103.7	73.0	77.9	74.9	71.2	84.6	64	36.9	38.9
Cms (µm/N)		116.5	89.8	130.0	130.0	159.6	133.3	175.8	183.3	167.7	153.1	157.7	265.3	183.9	156.6	269.1	297.8
Rms (Kg/s)		3.3	3.1	2.5	2.5	1.9	1.2	1.7	0.9	1.8	1.0	2.8	2.8	1.3	1.5	0.8	1.4
K _{im} (mN)		12.690	1.985	11.328	11.328	5.465	7.252	3.832	5.576	3.248	6.439	3.248	0.728	4.690	0.499	1.010	2.726
K _{esm} (mN)		124.087	52.746	145.326	145.326	27.308	104.348	26.845	90.344	22.920	124.381	22.920	12.311	39.660	10.151	9.092	35.461
Er _m		0.764	0.993	0.780	0.780	0.766	0.788	0.798	0.812	0.814	0.786	0.814	0.922	0.781	0.924	0.853	0.858
Ex _m		0.556	0.712	0.547	0.547	0.653	0.349	0.656	0.564	0.674	0.522	0.674	0.705	0.609	0.687	0.699	0.625
Dímetro da Bobina (mm)		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	75	46	46	42
g ₂₅ (l / °C)		0.00372	0.00380	0.00372	0.00372	0.00388	0.00345	0.00388	0.00345	0.00388	0.00370	0.00388	0.00368	0.00368	0.00344	0.00344	0.00344
Temp. Máx. Bobina (°C)		275	275	275	275	239	275	230	275	221	262	221	215	240	275	230	275
Área do Cone (m²)		0.1194	0.1194	0.0814	0.0814	0.1190	0.1194	0.0814	0.0814	0.0495	0.0495	0.0495	0.08605	0.08605	0.0840	0.0510	0.0522
X _{max} 10% distorção (mm)		9.3	6.5	9.3	9.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	3.0	5.7	1.25	1.25	1.25
X _{rel} p/ Dano (mm)		25	21	25	25	10.5	10.5	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	9.5	12.0	8.5	9.5	7.5
Alt. do Enrolamento (mm)		32	22	32	32	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	14.0	19.5	10.5	10.5	10.5
Altura do Gap (mm)		13.5	9	13.5	13.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
Material da Armilha		Poly cotton	Poly cotton	Poly cotton	Poly cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Poly cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Polimida
Material da Suspensão		Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton	Cotton
Material do Cone		Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose
Material do Imã		Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio
Material do Fio		Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato	Chato
Formato do Fio		Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo	Redondo
Material da Forma		Fiberglass	Fiberglass	Fiberglass	Fiberglass	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida	Polimida
Volume Ocupado (L)		8.6	8.6	6.6	6.6	8.0	8.5	6.0	6.5	4.5	5.0	4.0	4.0	4.3	3.8	1.8	2.1
Peso do Imã (g)		3.440	3.440	3.440	3.440	2.640	3.440	2.640	3.440	2.640	3.440	2.640	1.600	2.440	1.240	1.240	1.240
Peso Conjunto Mag. (g)		11.200	8.600	11.800	11.800	7.800	8.440	7.800	8.440	7.630	8.440	7.630	4.360	6.215	3.200	3.200	3.200
Peso Líquido (g)		14.180	10.500	13.920	13.920	11.480	11.800	11.080	10.800	9.710	10.400	8.690	5.390	7.090	4.190	3.940	3.710
Peso Total c/Embalagem		15.400	11.720	14.700	14.700	12.400	12.760	11.500	10.700	11.020	9.500	9.500	6.100	8.135	4.760	4.360	4.200
Temperatura (°C)		24	24	24	24	24	22	24	25	24	24	20	27	25	27	25	25
Pressão Atmosférica (mb)		1020	1022	1020	1020	1005	1023	1005	1021	1005	1005	1020	1000	1016	1002	1016	1002
Umidade Relativa Ar (%)		59	45	59	59	63	44	63	55	64	54	44	43	51	42	51	52
Modelo		18SWIP	18SW2P	15SWIP	15SWIP	18SWIP	18SWIP	15SWIP	15SWIP	18SWIP	18SWIP	15SWIP	15SWIP	12CV3	12CV3	10PW3	8PW3

fonte: (Adaptado de JBL PRO/Spec Sheets, 2019)

Tabela 23 – Densidade dos materiais.

Material	Densidade (g/cm3)	Material	Densidade (g/cm3)	Material	Densidade (g/cm3)
acetato de sódio	1,45	crômio	7,19	ricino (óleo de mamona)	0,96
ácido benzóico	1,26	cromo	7,10	silica (dióxido de silício)	1,95 a 2,10
ácido crômico	1,32	dbp (dibutil ftalato)	1,02	silicato de alumínio	2,60
ácido esteárico	0,85	deg (dietileno glicol)	1,12	silicato de cálcio	2,10
ácido láurico	0,90	dibutil sebacato	0,94	sulfato de bário (barita)	4,50
ácido oléico	0,89	dióxido de titânio	3,88	sulfenamida	1,29 a 1,38
ácido salicílico	1,44	ditiomorfolina	1,36	sulfeto de zinco	3,92
aço forjado	7,86	dolomita	2,34	talco	2,72
aço fundido	7,50	dop (dioctil ftalato)	0,97	tea (trietanolamina)	1,12
aço Inox	7,85	dotg (dioctil guanidina)	1,10	teflon (PTFE)	2,40
aço sem liga	7,85	dpg (difenil guanidina)	1,13 a 1,20	tiocarbamilida	1,26 a 1,32
acrilonitrila	0,80	enxofre	2,07 a 2,18	titânio	4,55
alcatrão de pinho	1,08 a 1,18	estanho	7,29	toluol	0,87
alumina	3,14 a 4,00	estearato de cádmio	1,20	tricosil fosfato	1,13
alumina hidratada	2,42	estearato de zinco	1,05	trifenil guanidina	1,10
alumínio	2,70	etileno tiuréia	1,42	tungstênio	19,30
alumínio fundido	2,56	factis	1,04 a 1,08	UHMW (PE alto peso mol. - Dynema)	0,93
alumínio laminado	2,70	fenolite	1,35	urânio	18,95
amianto (asbestos)	2,47	ferro	7,87	uréia	1,34
antioxidantes aminicos	1,09 a 1,21	ferro fundido BC	7,50	vaselina sólida	0,90
antioxidantes fenólicos	1,05	ferro fundido CZ	7,25	xilol	0,86
antioxidantes fosfitos	0,98	gálio	5,91	zarcão (minio)	8,62
antioxidantes quinonas	1,06	gesso	2,32	zinco	7,14
antiozonantes diaminas	0,99 a 1,23	glicerina	1,27		
antiozonantes oximas	1,10	grafite	2,25		
antiozonates ceras microcristalinas	0,99	guayule	0,96		
asfalto oxidado	1,00 a 1,20	gutta percha	0,98		
azodicarbonamida	1,60 a 1,80	hidróxido de cálcio	2,28		
balata	0,97	isopreno	0,68		
bário	3,59	lanolina	1,07		
benzeno	0,88	latão laminado	8,50		
berílio	1,85	latão recozido	8,40		
betonita	2,50	látex	0,97		
bicarbonato de amônia	1,58	litargírio	9,35		
bicarbonato de sódio	2,20	lítio	0,53		
bismuto	8,90	litopônio	4,15		
boráx	1,73	magnésio	1,74		
borracha acrílica (ACM / ANM)	1,10	manganês	7,47		
borracha butil (IIR)	0,92	mercúrio	13,55		
borracha clorada	1,64	metil etil cetona	0,83		
borracha epidioridrina (ECO)	1,40 a 1,45	mica	2,95		
borracha fluorada (FKM)	1,27 a 1,36	minio (zarcão)	8,62		
borracha natural (NR)	0,91 a 0,93	negro de fumo	1,80		
borracha nitrílica (NBR)	1,00	níquel	8,91		
borracha polibutadieno (BR)	0,94	óleo aromático	0,93 a 1,05		
borracha polidloropreno (CR)	1,23	óleo mineral	0,87		
borracha poliisopreno (IR)	0,94	óleo naftênico	0,90 a 0,93		
borracha polissulfeto	1,25 a 1,34	óleo parafínico	0,86 a 0,90		
borracha poliuretano (PU)	1,05	óleo polimérico (totm)	0,99		
borracha silicone (MQ)	0,95	ouro	19,28		
borracha silicone fluorada	1,30	óxido de alumínio	3,14 a 4,00		
breu	1,08	óxido de cádmio	6,95		
bronze (CuSn6)	8,83	óxido de cálcio	3,20		
bronze de Alumínio	7,70	óxido de cromo verde	5,21		
bronze Fosfórico	8,80	óxido de ferro vermelho	5,14		
bronze Vermelho	8,80	óxido de magnésio	3,20		
butadieno 1,3	0,65	óxido de zinco	5,57		
butiraldeído-anilina	0,95 a 1,04	ozoquerita (cera mineral)	0,92		
cádmio	8,65	paládio	12,00		
cálcio	1,53	parafina	0,91 a 0,93		
carbonato de bário	4,30	parafina clorada	1,14 a 1,65		
carbonato de cálcio	2,62 a 2,70	peptizante	0,94		
carbonato de magnésio	2,22	peróxido dicumila 40%	1,60		
carbonato de zinco	3,30	platina	21,45		
caseína	1,26	pó de borracha	1,15		
caulim	2,60	poliamida (Nylon)	1,14		
celeron	1,35	polietileno clorossulfonado	1,10		
cera de carnaúba	0,99	polietileno de alta densidade	0,96		
cera de polietileno	0,92	polietileno de baixa densidade	0,92		
césio	1,87	polipropileno	0,90 a 0,91		
chumbo	11,30	politetrafluoretileno (PTFE - Teflon)	2,20		
chumbo	11,34	poliuretano (shore90)	1,25		
cobalto	8,80	prata	10,50		
cobre	8,93	querosene	0,82		
cobre fundido	8,85	resina de cumarona indeno	1,07 a 1,15		
cobre laminado	8,95	resina de estireno	1,01		
cobre recozido	8,80	resina hidrocarbônica	1,06		
				fibra de vidro	2,5
				neodímio	7,5

fonte: (Adaptado de Corazza, I., 2012)

ANEXO C – RESULTADOS METODOLÓGICOS DOS ÍMÃS

Tabela 24 – Resultados TRACI 2.1 dos ímãs.

<i>Short Name</i>	<i>Description</i>	<i>Unit</i>	Ferrite	NdFeB
GWP	Global Warming Air, incl. biogenic carbon.	kg CO2 eq.	7.69E+01	4.63E+01
AP	Acidification.	kg SO2 eq.	2.64E+01	1.89E+01
EP	Eutrophication	kg N eq.	7.20E-02	4.10E-02
ODP	Ozone Depletion Air	kg CFC 11 eq.	4.18E-06	3.32E-06
Ecotox Air	Ecotoxicity	CTUe	4.17E+02	2.25E+02
Human Health Particulate Air	Human Health Particulate Air	kg PM2.5 eq.	2.50E-01	1.70E-01
Human toxicity, cancer	Human toxicity, cancer	CTUh	1.99E-10	3.23E-10
Human toxicity, non-canc	Human toxicity, non-canc.	CTUh	8.74E+03	4.28E+03
Resources, Fossil fuels	Resources, Fossil fuels	MJ surplus energy	0.00E+00	0.00E+00
Smog Air	Smog Air	kg O3 eq.	2.00E-01	1.70E-01
Global Warming Air	Global Warming Air, excl. biogenic carbon	kg CO2 eq.	0.00E+00	0.00E+00

fonte: (Adaptado de Navarro, J., 2014)