

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

ALLAN DI CUNTO D'AVILA DE ALMEIDA

Cenários de Ecodesign para alto-falantes

São João da Boa Vista

2022

Allan Di Cunto D’Avila de Almeida

Cenários de Ecodesign para alto-falantes

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica , junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

São João da Boa Vista

2022

A447c Almeida, Allan Di Cunto D'Avila de
Cenários de ecodesign para alto-falantes / Allan Di Cunto
D'Avila de Almeida. -- São João da Boa Vista, 2022
78 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: José Augusto de Oliveira
Coorientador: Rafael Abrantes Penchel

1. Alto-falantes. 2. Ecodesign. 3. Sistema de gestão
ambiental. 4. Biomateriais. 5. Componentes. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Ecodesign para alto-falantes

AUTOR: ALLAN DI CUNTO D'AVILA DE ALMEIDA

ORIENTADOR: JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA

COORIENTADOR: RAFAEL ABRANTES PENCHEL

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área:
Automação pela Comissão Examinadora:

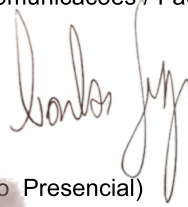
Jose Augusto de
Oliveira:28491501851

Assinado de forma digital por Jose
Augusto de Oliveira:28491501851
Dados: 2022.12.21 15:35:57 -03'00'

Prof. Dr. JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA (Participação Presencial)

Coordenadoria de Curso de Engenharia Eletronica e de Telecomunicacoes / Faculdade de Engenharia de Sao Joao da Boa Vista

Dr. CARLOS JOSÉ PEREZ GORGA (Participação Presencial)
Harman do Brasil



Pesquisadora Dra. MIRIAN PAULA DOS SANTOS (Participação Presencial)

Center for Advanced and Sustainable Technologies (CAST) / Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista

Profa. Dra. GRETHELL GEORGINA PÉREZ SÁNCHEZ (Participação Presencial)

División de Ciencias Básicas e Ingeniería / Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)

São João da Boa Vista, 04 de novembro de 2022



Priscila de Oliveira dos Santos
Supervisora Técnica de Seção - Substituta
Seção Técnica de Graduação e Pós-Graduação

Esta dissertação contou com o apoio da(s) seguinte(s) entidade(s):
CAST - Center for Advanced and Sustainable Technologies
AUIN - Agência Unesp de Inovação
FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

*“...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 mercado mundial de alto-falantes segue a tendência crescente das tecnologias de entretenimento eletrônico tanto em quantidade quanto em variedade. Consequentemente, os impactos ambientais causados durante o ciclo de vida dos alto-falantes aumentam na mesma proporção, indo na direção oposta ao que é determinado pelas leis e regulamentações ambientais mundiais e pelas tendências do mercado global. Mesmo assim, o desempenho ambiental desse tipo de produto não é considerado no processo decisório para atualizações tecnológicas no projeto de alto-falantes. Nesse sentido, o Ecodesign é a ferramenta de Engenharia de Ciclo de Vida mais adequada aplicada no projeto de um produto, uma vez que o desempenho ambiental é considerado ao longo das diferentes etapas do projeto. No entanto, a viabilidade do Ecodesign em produtos que exigem cadeias produtivas complexas depende da divisão do produto em subsistemas e componentes. Visando um processo assertivo para a tomada de decisão e implementação do Ecodesign, utilizou-se a avaliação do ciclo de vida, delimitando a metodologia com o foco de avaliar o desempenho ambiental de cada etapa e componente de um alto-falante em produção. Cenários de substituição de matéria-prima e modelagens serão aplicados e analisados, o que permitirá identificar a proposta com melhor desempenho ambiental dentro das tecnologias atuais.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação do ciclo de vida; ecodesign; alto-falante; desempenho ambiental.

ABSTRACT

The worldwide loudspeaker market follows the growing trend of electronic entertainment technologies in both quantity and variety. Consequently, the environmental impacts caused during the life cycle of the loudspeakers increase in the same proportion, going in the opposite direction to what is determined by the world environmental laws and regulations and the global market trends. Even so, the environmental performance of this type of product is not considered in the decision-making process for technological upgrades in loudspeaker design. In this sense, Ecodesign is the most appropriate Life Cycle Engineering tool applied in the design of a product, since environmental performance is considered throughout the different stages of the project. However, the feasibility of Ecodesign in products that require complex production chains depends on the division of the product into subsystems and components. Aiming at an assertive process for decision-making and implementation of Ecodesign, life cycle assessment was used, delimiting the methodology with the focus of evaluating the environmental performance of each stage and component of a loudspeaker in production. Scenarios of substitution of raw material and modeling will be applied and analyzed, which will allow to identify the proposal with the best environmental performance within the current technologies.

KEYWORDS: life cycle assessment; eco design; loudspeaker; environmental performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Plot do espectro de frequência do sistema AMBEO SB01.	15
Figura 2	Diagrama do roteiro da revisão bibliográfica sistemática.	19
Figura 3	Publicações por ano.	21
Figura 4	Fluxograma adaptado do protocolo PRISMA.	22
Figura 5	Estratificação do fluxo produtivo do produto para Ecodesign.	23
Figura 6	Seção transversal da representação de um alto-falante.	24
Figura 7	Seção transversal da chapa polar com as orientações magnéticas (COLLOMS, 2018).	25
Figura 8	Linhas representativas da densidade do fluxo magnético, (a) fluxo no <i>gap</i> sem corrente induzida pela bobina (b) fluxo com corrente induzida pela bobina (BORWICK, 2001).	26
Figura 9	Curvas de desmagnetização de materiais magnéticos (BORWICK, 2001).	26
Figura 10	Seção transversal da bobina e forma da bobina (BORWICK, 2001).	27
Figura 11	Seção transversal do chassi do alto-falante (BORWICK, 2001).	28
Figura 12	Vistas frontais e laterais do alto-falante.	35
Figura 13	Fluxo de fases da ACV.	39
Figura 14	Segmentação das etapas e processos de produção de um alto-falante.	46
Figura 15	Resultados AICV normalizado em termos percentuais.	52
Figura 16	Resultados AICV normalizado em termos percentuais, exceto conjunto magnético.	53
Figura 17	Resultados AICV com o conjunto magnético suprimido em relação às componentes.	54
Figura 18	Resultados AICV com o conjunto magnético suprimido em relação às categorias.	54
Figura 19	Normalização dos resultados da sobra em percentil.	56
Figura 20	Exemplo da pirâmide polimérica.	57
Figura 21	Comparativo do conjunto magnético com biomateriais.	59
Figura 22	Fluxos para união das componentes.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção mundial de veículos por região (em milhões).	14
Tabela 2 – Etapas e fases do roteiro de revisão bibliográfica sistemática.	20
Tabela 3 – União das componentes, etapas I à III.	31
Tabela 4 – União das componentes, etapas III à VI.	32
Tabela 5 – União das componentes, etapas VI à IX.	33
Tabela 6 – Comparação de adesivos para etapas de união das componentes.	34
Tabela 7 – Dimensões do alto-falante.	35
Tabela 8 – Informações técnicas do alto-falante.	36
Tabela 9 – Parâmetros Thiele/Small do alto-falante.	37
Tabela 10 – Normas ISO - Avaliação do Ciclo de Vida.	38
Tabela 11 – Categorias de impacto TRACI 2.1.	40
Tabela 12 – Informações de produção do conjunto magnético.	47
Tabela 13 – Informações de produção do conjunto bobina.	48
Tabela 14 – Informações de produção do chassi.	48
Tabela 15 – Informações de produção da aranha.	48
Tabela 16 – Informações de produção do cone.	49
Tabela 17 – Informações de produção da suspensão.	49
Tabela 18 – Informações de produção da calota.	50
Tabela 19 – Informações dos adesivos para junção das componentes.	50
Tabela 20 – Valores de entrada e saída das componentes.	55
Tabela 21 – AICV - TRACI 2.1 da sobra das componentes.	56
Tabela 22 – AICV - Comparativo dos materiais para conjunto magnético.	58
Tabela 23 – Resultados da síntese qualitativa.	65
Tabela 24 – Resultados da AICV para o modelo (TRACI 2.1).	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGR	Taxa de crescimento anual composta
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
WCED	Comissão Mundial sobre Meio ambiente e Desenvolvimento
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
ISO	Organização Internacional de Normalização
GWP	Potencial de Aquecimento Global
EoL	Fim de Vida
Nd	Neodímio
O ₃	Ozônio
Fe ₂ O ₃	Óxido Férnico
Al	Alumínio
Cu	Cobre
Pb	Chumbo
N	Nitrogênio
P	Fósforo
SO ₂	Dióxido de Enxofre
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NH ₃	Amônia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS DO TRABALHO	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Específicos	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	Caracterização do processo fabril	24
4.2	Componentes	24
4.3	União das componentes e materiais	30
4.4	Modelo em produção	34
4.4.1	Informações comerciais	35
4.4.2	Parâmetros eletromecânicos	36
4.5	Procedimentos para ACV	38
4.6	Escopo da ACV	39
4.6.1	Escolha dos parâmetros	39
4.6.2	Sistema de fronteiras	42
4.6.3	Unidade funcional	42
4.6.4	Qualidade dos dados	42
4.7	Cronograma e plano de ação	42
4.8	Modelagem	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Transporte	45
5.2	Consumo de energia elétrica	45
5.3	Análise do inventário do ciclo de vida	46
5.3.1	Conjunto magnético	47
5.3.2	Conjunto bobina	47
5.3.3	Chassi	48
5.3.4	Aranha	48
5.3.5	Cone	49
5.3.6	Suspensão	49
5.3.7	Calota	49
5.3.8	Adesivos de junção	50
5.4	União das componentes	51
5.5	Avaliação de impacto do ciclo de vida	51

5.6	Interpretação do ciclo de vida	51
5.7	Cenários e proposta de opções para Ecodesign	55
5.7.1	Sobras	55
5.7.2	Biomateriais	57
5.7.3	Biomateriais - Cenários	58
5.8	Considerações finais	59
6	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – FLUXOS E RESULTADOS	64

1 INTRODUÇÃO

A taxa de crescimento anual composta (CAGR - *Compound annual growth rate*) do mercado global de alto-falantes está aumentando e espera-se que cresça a uma taxa de 7,3 % até 2028 (FMI, 2018). Desse montante, a América do Norte e o Sudeste Asiático têm 40 % de participação no mercado. Consequentemente, a menos que os aspectos ambientais sejam considerados durante o projeto deste produto, seus impactos ambientais aumentarão inexoravelmente (BRESSANELLI et al., 2020; PÉREZ-MARTÍNEZ et al., 2021). Essa tendência contraria objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 21 da Organização das Nações Unidas (ONU) e da Economia Circular (MHATRE; PANCHAL; SINGH A. BIBYAN, 2021).

No que diz a respeito da produção global, além de sistemas convencionais, temos novas tecnologias emergentes atreladas à alto-falantes sendo produzidas em larga escala devido grande interesse do consumidor pelo desejo de tecnologias inovadoras na última década, por exemplo, baseadas em voz chamadas de *Smart Assistant* ou auto-falante inteligente que devem movimentar, até o fim de 2022 mais de U\$ 40 bilhões com um número de usuários crescendo a uma taxa anual composta de 47,9 % de acordo com o relatório da eMarketer (PETROCK, 2020). Outra projeção publicada na Forbes, afirma que até 2025, aproximadamente 300 milhões de pessoas usarão algum tipo de alto-falante inteligente, sendo que os sistemas mais tradicionais são a Alexa, da Amazon, e o Assistente, do Google. Enquanto a Amazon e o Google são atualmente líderes do mercado, o HomePod da Apple começa a ser um potencial para ganhar participação este ano e a Microsoft está trabalhando para trazer a Cortana ao mercado em dispositivos Harman Kardon. Outro viés com crescente avanço, o de *streaming* de vídeo aliado a tecnologias inovadoras que fazem o consumidor investir em melhores sistemas chamados *home-theater* ou até mesmo barras de som (*Sound Bar*), que entregam robustez e riquezas em recursos na qualidade da experiência de áudio e consequentemente ampliam a quantidade de alto-falantes em produção, como exemplo o sistema AMBEO SB01 do fabricante Sennheiser em que apenas uma barra de som é composta por 13 alto-falantes em sua construção (PACETE, 2022).

Outro prisma de comparação e de grande parcela para produção de alto-falantes, é a produção de veículos automotores. Em 2021, foram produzidos 79,1 milhões de veículos em todo o mundo, um aumento total de 1,3 % em relação a 2020 conforme exibido na Tabela 1 (ACEA, 2021). Para cada veículo produzido, majoritariamente, são adicionado em sua construção quatro alto-falantes (dois frontais e dois traseiros), chegando a um número médio de 316,4 milhões de alto-falantes produzidos por ano em todo o mundo, destinados apenas para veículos automotores. Na Tabela 1, temos a variação da quantidade de veículos produzidos por região entre o ano de 2021 e 2022, no geral, onde é possível observar um crescimento em quase todas as regiões.

Tabela 1 – Produção mundial de veículos por região (em milhões).

REGIÃO/PAÍS	2020	2021	%
China	25.533	25.553	0,08 %
Europa	17.070	16.247	-5,07 %
América do norte	13.484	13.518	0,25 %
Japão/Coréia	11.361	10.990	-3,38 %
Sul da Ásia	6.466	8.055	19,73 %
América do sul	2.361	2.729	13,48 %
Oriente Médio/África	1.809	1.990	9,10 %

No âmbito técnico de um alto-falante, o esperado e ideal é que o consumidor extraia do alto-falante uma reprodução sonora com as mesmas características por quem a gravou. Com esse escopo, os melhores alto-falantes tentam ser o mais fiel possível, sendo um grande desafio pois esse objetivo vai além do alto-falante em si, sendo impactado por outras partes que compõe todo o sistema, como a qualidade do amplificador, isolamento acústico, ruídos no sinal de entrada, qualidade dos condutores, harmônicas presentes na rede elétrica e outros fatores externos. Para compreender, uma das métricas de desempenho mais importantes e informativas é a resposta de frequência do alto-falante, onde pode-se dividir a análise em amplitude e fase, que juntas descrevem o comportamento linear do sistema (BORWICK, 2001; EARGLE, 2003). Como outra característica fundamental de um alto-falante, ligada também a fidelidade da reprodução é de conseguir a reprodução com precisão das frequências de todo o espectro auditivo humano, em alguns casos, quando ultrapassada essa banda em alto-falantes acaba sendo absorvida para o ser humano apenas uma sensação de vibração.

Para a resposta de frequência, quanto mais uniforme for a amplitude e a resposta de fase por toda banda de operação, melhor será a qualidade do alto-falante, pois o próprio alto-falante irá reproduzir o sinal recebido com exatidão sem nenhuma alteração introduzida por ele mesmo. Em outras palavras, em um gráfico de resposta de frequência de um determinado alto-falante, é desejável ver uma linha reta em vez de uma linha com picos e vales. Dado um sinal de um amplificador e fonte de áudio ideais, as variações na resposta de frequência plana podem muitas vezes ser atribuídas aos seus processos de construção e materiais utilizados, que podem variar significativamente. Como exemplo, o cone de propagação (componente de um alto-falante) pode ser feito de papel composto, alumínio (Al), polipropileno ou até mesmo fibra de vidro, tendo cada um desses materiais um comportamento diferente em determinada faixa de frequência. Para ilustrar sobre a resposta de frequência detalhada anteriormente, a Figura 1 (BONNETERRE; KATSAOUNIS; KHONG, 2019), representa o gráfico de resposta de frequência do sistema AMBEO SB01 do fabricante Sennheiser citado anteriormente.

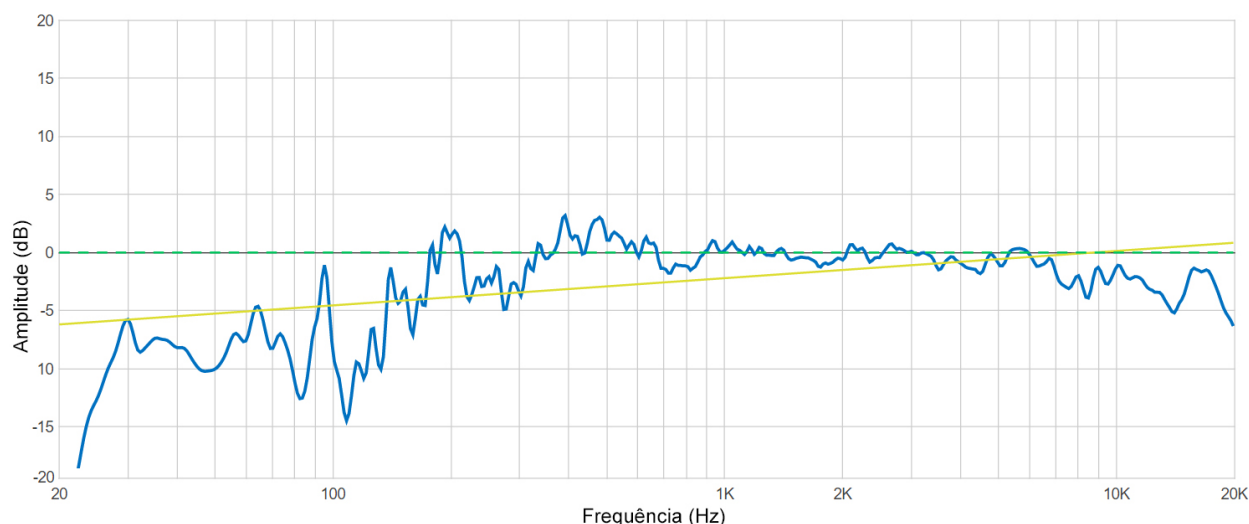


Figura 1 – Plot do espectro de frequência do sistema AMBEO SB01.

Para plotar a Figura 1, a metodologia e a coleta dos dados é realizada pelo envio de um sinal senoidal de -6 dB, entre 20 Hz e 20 kHz ao alto-falante e captado por microfones de alinhamento acústico, posicionado em uma sala de 25 m² com redutores de reflexão e isolada acusticamente. Com um medidor de nível de pressão sonora SPL (*Sound Pressure Level*), o sistema é ajustado para 80 dB, onde a linha contínua em verde aponta o nível ideal de referência, linha amarela a regressão linear e a azul o comportamento da resposta de frequência do sistema AMBEO SB01 (BONNETERRE; KATSAOUNIS; KHONG, 2019). Podemos extrair diversas considerações que nos dão uma melhor compreensão quando é analisada a resposta de frequência de um alto-falante ou de um conjunto de alto-falantes, incluindo o nível de atenuação ou ganho em determinada faixa de frequência, extensão de baixa e alta frequência e consequentemente a qualidade sonora geral do alto-falante.

Em relação ao seu princípio de funcionamento, grande parte dos modelos de alto-falantes funcionam de maneira semelhante: na parte de trás do sistema do alto-falante, geralmente, um ímã circular em forma de coroa é mantido firmemente com uma estrutura rígida onde uma bobina é colocada dentro e imersa em um campo magnético em torno deste ímã. No entanto, em contraste com o ímã, a bobina está presa a uma peça móvel, pois o alto-falante é alimentado com uma tensão, e mudanças no campo elétrico fazem com que uma bobina de material condutivo dentro do ímã se mova. Anexado a este há uma membrana, geralmente feita de papel ou plástico, que se move para frente e para trás quando uma corrente elétrica é aplicada na bobina. A direção em que esse sistema se desloca está de acordo com a polaridade dessa corrente elétrica, a membrana se afasta do ímã de acordo com a polaridade e flui na direção oposta quando invertido, criando assim, ondas sonoras com esse deslocamento de ar correspondente à frequência. Para baixas frequências, próximas a 20 Hz ocorre algumas dezenas de vezes por segundo, para altas frequências, acontece até 20.000 vezes ou mais por segundo. A razão do tamanho do alto-falante por exemplo afeta diretamente a faixa de frequências que ele pode produzir, portanto, um alto-falante maior pode deslocar mais ar, mas não rapidamente devido a limitações mecânicas, tornando-o melhor na reprodução de frequências menores. Já um alto-falante menor não consegue deslocar tanto ar e, consequentemente, pode se mover muito mais rápido, produzindo frequências mais elevadas (BORWICK, 2001).

Já para o âmbito de equilíbrio ambiental entre as áreas, podemos definir a sustentabilidade como o balanço ou integração de questões ambientais, sociais e econômicas. Em 1987 a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED) definiu sustentabilidade como o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades (NATIONS, 1987). Nesse contexto, existem diversas leis e regulamentações em todo o mundo que incentivam a adequação dos negócios aos princípios da Economia Circular. Por exemplo, nos Estados Unidos da América existem leis e regulamentos previstos para a Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA) (EPA, 2020). A legislação europeia conta com a Restrição de Certas Substâncias Perigosas (RoHs), que limita o uso de algumas substâncias nos processos de fabricação de produtos, e o Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) que impõe obrigações às organizações, contendo as regras aplicáveis ao lixo eletrônico. Em geral, esta diretriz incentiva e define critérios específicos para a coleta, manuseio e reciclagem de resíduos eletroeletrônicos (MICAH, 2015; BRESSANELLI et al., 2020). No Brasil, por exemplo, a Lei nº. 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), prevê a prevenção e redução da geração de resíduos, uma proposta para a prática de hábitos de consumo sustentáveis e um conjunto de instrumentos para aumentar a reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos sólidos (PNRS, 2010).

Além disso, alguns padrões foram propostos para estimular a adaptação das organizações ao contexto de melhoria dos aspectos ambientais relacionados às suas atividades. Alguns exemplos marcantes dentro da família ISO 14000 são, ISO 14001 (2015), que fornece diretrizes para um Sistema de Gestão Ambiental, ISO 14040 (2009) e ISO 14044 (2009) que contemplam práticas para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos, e ISO 14006 (2011), que trata da implementação do Ecodesign ou Design for Environment. Esses padrões incluem planos para processos decisórios que contribuem para a prevenção de impactos ambientais como contaminação do solo, água e ar (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

No que diz respeito ao design do produto, considerando a perspectiva de todo o ciclo de vida, o Ecodesign se destaca como uma das principais técnicas para o setor produtivo em busca da Economia Circular (POLVERINI, 2021; POLLINI; ROGNOLI, 2021). No entanto, em produtos com cadeias de fabricação complexas já estabelecidas no mercado, como o caso dos alto-falantes, alterações em todo o projeto do produto são de difícil aplicação na prática, pois demandam custos e longas e complexas avaliações. Assim, estratificar o produto (sistema) em subsistemas e componentes pode ser uma raiz viável para aplicar o Ecodesign neste tipo de produto. Além disso, a abordagem supracitada pode ser aprimorada ainda mais com uma aplicação prévia de ACV para identificar *hotspots* ambientais e classificar prioridades para aplicação de mudanças no design do produto visando o Ecodesign (POLLINI; ROGNOLI, 2021).

A ACV também se aplica aos processos decisórios na etapa de engenharia de produto, propondo a utilização de materiais menos agressivos ao meio ambiente, racionalizando e otimizando o uso de energia e matérias-primas. Além disso, com base nos resultados da ACV, os engenheiros podem projetar produtos com vida útil estendida, facilitando sua desmontagem para uso de seus componentes e possibilitando a reciclagem de seus materiais (OLIVEIRA et al., 2021).

Na Gestão de Operações, a ACV pode contribuir para definir a escolha dos recursos produtivos, além da forma como serão integradas as atividades relacionadas à fabricação do produto ou à prestação de serviços. Com base nos resultados da ACV, o planejamento de uso de recursos, necessidades de materiais, desenvolvimento de produtos e controle de produção são elaborados com mais eficiência. Portanto, é importante observar que a ACV não se limita a modificar o design dos produtos, mas se estende aos seus processos produtivos. Se um processo não é avaliado positivamente do ponto de vista da sustentabilidade, por exemplo, por demandar grande quantidade de materiais ou energia, ou pela geração de excesso de resíduos, esse processo deve ser objeto de estudos e melhorias (OLIVEIRA et al., 2021).

O cumprimento das leis ambientais não é restrito apenas uma questão de obrigação, a reputação de uma organização está fortemente ligada à forma como ela lida com os aspectos ambientais de seus produtos, serviços e processos. Uma organização deve ter uma boa reputação não apenas para consolidar sua imagem, mas também para aproveitar as oportunidades de negócios, pois muitas empresas exigem que seus parceiros possuam certificações que comprovem sua conformidade com as normas ambientais (ADIBI; LAFHAJ; PAYET, 2019). A ACV dos produtos possibilita indiretamente, encontrar fontes alternativas de matéria-prima e energia, desenvolvendo processos que exigem menos insumos e geram menos resíduos, identificando a possibilidade de reaproveitamento de subprodutos ou partes do produto acabado e dando uma destinação adequada ao produto após a sua eliminação pelo consumidor. É possível também tornar o produto 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.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor cenários de Ecodesign para melhoria do desempenho ambiental de um alto-falante.

2.2 ESPECÍFICOS

Definido como objetivos específicos, os que fazem parte diretamente ou indiretamente com os objetivos gerais, meios para a conclusão e documentações desta pesquisa, são eles:

- Separar o sistema (alto-falante) em subsistemas e componentes;
- Compreender e mapear todos os processos e fluxos de produção;
- Levantar e analisar o Inventário do Ciclo de Vida dos componentes;
- Avaliar os impactos ambientais e definir os *hotspots*;
- Gerar cenários e avaliar seus desempenhos ambientais;
- Analisar qualitativamente a viabilidade tecnológica dos cenários gerados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a revisão bibliográfica foi adotado o modelo de revisão sistemática, com caráter narrativo e com rigor científico para alcançar melhores resultados e reduzir erros neste processo. Esta metodologia tem como objetivo, auxiliar e criar fluxos cíclicos para encontrar referências e novos estudos recém publicados, buscando analisar de forma qualitativa um grande volume de dados e refinando hipóteses para aumentar a confiabilidade na pesquisa. Para a aplicação deste modelo foi seguido um roteiro apresentado por (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011), onde temos um ciclo para cada busca realizada de forma a conhecer detalhes da literatura, compreender, revisar, analisar melhor quando atingido o objetivo. Podemos expandir este ciclos em fases, etapas e adotar filtros conforma mostrado na Figura 2, que exemplifica o *roadmap* desta metodologia.

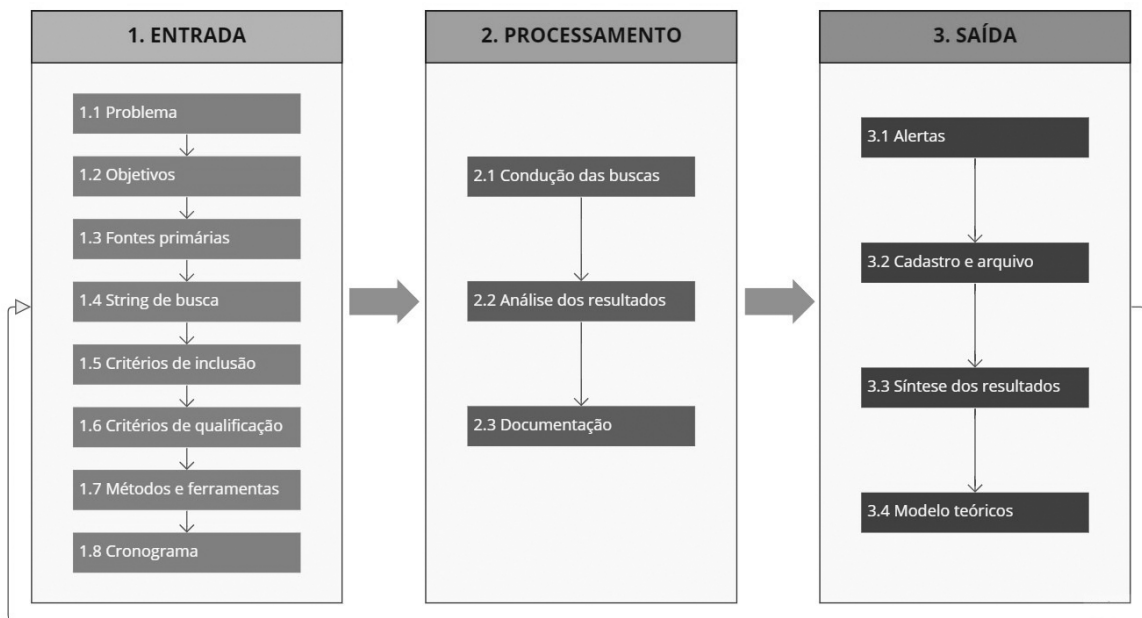


Figura 2 – Diagrama do roteiro da revisão bibliográfica sistemática.

O *roadmap* está organizado em 15 etapas dentro de 3 grandes fases, sendo elas: Entrada (1); Processamento (2) e Saída (3). Abaixo na Tabela 2, será realizada uma breve descrição de cada uma delas.

Tabela 2 – Etapas e fases do roteiro de revisão bibliográfica sistemática.

FASE 1	DEFINIÇÃO DAS ETAPAS
1.1 - Problema	Estratificação do problema onde deve ser formulado na forma de pergunta de forma clara e objetiva
1.2 - Objetivos	Esta etapa deve ser alinhada com o objetivo da pesquisa sendo sólida e sempre criteriosa para delimitar a busca
1.3 - Fontes primárias	Fontes que pertencem a artigos, periódicos ou bases de dados onde serão úteis para a definição de palavra-chave
1.4 - String de busca	Refere-se a aplicação de mecanismos de pesquisa avançado, buscas booleanas e operadores lógicos
1.5 - Critérios de inclusão	Após levantado o objetivo da pesquisa, saber identificar qual busca está atrelada ao caráter teórico ou definição de termos, caso contrário, a exclusão deste resultado
1.6 - Critérios de qualificação	Observar elementos de qualidade nos resultados encontrados, como número de referências, tamanho da amostra analisada
1.7 - Método de ferramentas	Definir etapas para as buscas, filtros, a forma que será armazenada e catalogada
1.8 - Cronograma	Delimitar um período de busca e planejamento da leitura de textos segundo os filtros de busca
FASE 2	DEFINIÇÃO DAS ETAPAS
2.1 - Buscas	Realização de buscas em periódicos, busca cruzada e base de dados
2.2 - Filtros	Etapa da leitura dos resultados para a criação de filtros e análise dos resultados
2.3 - Documento	Compilar a quantidade de resultados considerados úteis e de qualidade dos excluídos, refinar o ciclo de busca e documentar
FASE 3	DEFINIÇÃO DAS ETAPAS
3.1 - Alertas	Aplicação de alertas (e-mail) nas fontes relevantes identificadas ao longo do ciclo, afim de atualizar com novas versões e publicações mais recentes
3.2 - Cadastro e arquivo	Os resultados considerados relevantes serão catalogados e armazenados podendo ser realizado por softwares desse nicho
3.3 - Síntese e resultados	Etapa onde é realizada uma síntese da bibliografia estudada
3.4 - Modelos teóricos	Construção de modelos teóricos, definição de hipóteses e síntese do tema estudado.

Portanto, o principal objetivo da revisão foi identificar trabalhos publicados em diferentes idiomas e base de dados que abordem o tema desta dissertação, com base nas diretrizes da RBS. As bases de dados usadas para pesquisa na literatura, foram a Web of Science (WOS), Scopus, Scielo, Google Scholar e ScienceDirect. Sendo estes, abrangendo um maior número de periódicos recentes incluindo aqueles relativos à Engenharia de Produção, Engenharia Ambiental e Engenharia Acústica. No caso via motores de busca genéricos, foi utilizado o Google e DuckDuckGo com modificadores de *string*, sendo o *filetype* para filtrar apenas sites que exibem o documento completo e as *keywords* entre o caractere aspas, que força a varredura para buscar fragmentos com a ordem e palavra exata.

Quantitativamente, foram encontrados trabalhos escritos em diferentes idiomas, com os termos ou parte dos termos pesquisados nos títulos, resumos ou palavras-chave, limitando o período de publicação entre 2000-2021. No total, 62 publicações foram encontradas após a pesquisa inicial em todas as base de dados. Para melhor organização, foram separado em resultados relacionados apenas ao tema alto-falante, ACV e a relação entre eles. Deste total, 28 são artigos, 15 são capítulos de livros, 5 são

notas técnicas, 5 são pesquisas curtas disponíveis como versão online, 4 são teses, 3 são dissertações e 2 são trabalhos de conclusão de curso.

Para a fase de análise, foram considerados dados como ano de publicação, periódicos, autores e características do estudo, observando que a partir de 2013, houve um aumento de publicações, um pico em 2014 e 2015, com 14 trabalhos publicados nesse período, correspondendo a 22,58 % do total com uma média de 2,69 publicações por ano. A Figura 3, sintetiza todas as quantidades encontradas e mencionadas anteriormente.

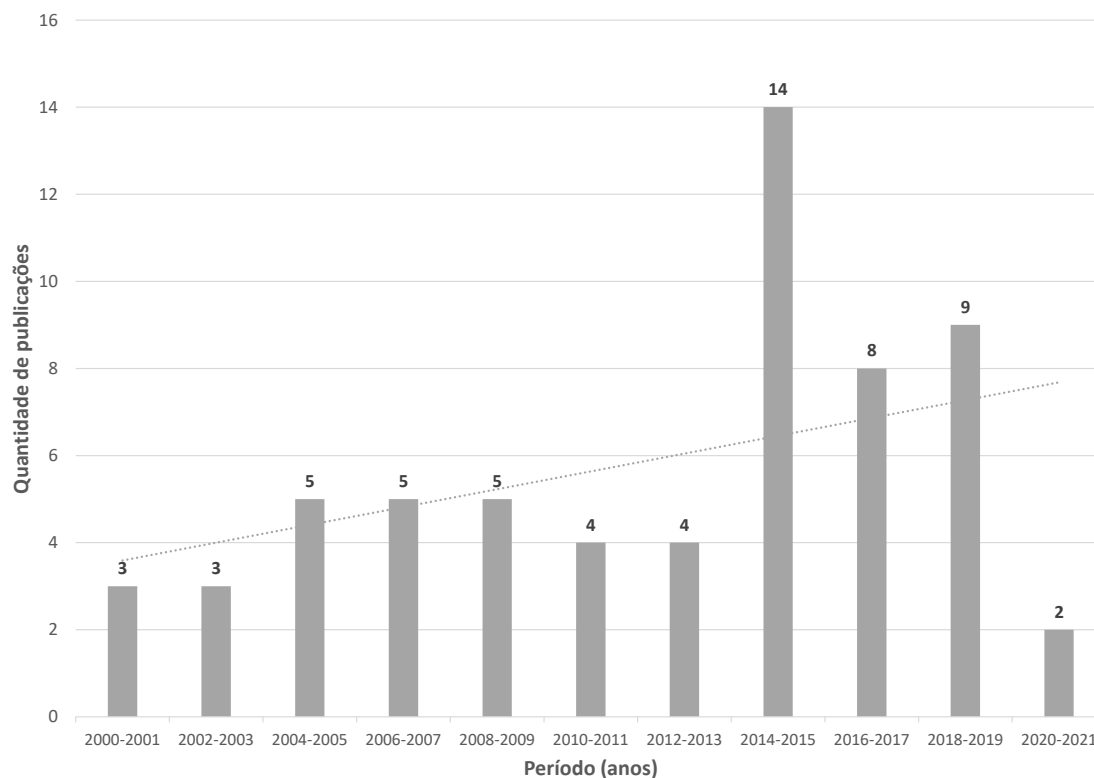


Figura 3 – Publicações por ano.

Quanto aos idiomas dos documentos, 46 (74,19 %) em inglês, 16 publicações foram escritas em português, representando 25,81 % da amostra. Quanto aos gêneros das publicações, 26 são empíricas e 36 são teóricas. Segundo suas abordagens, 25 publicações são qualitativas e 37 qualitativas-quantitativas. A última análise quantitativa retrata os setores da indústria cobertos nas publicações, os setores mais relevantes são 32 para ACV, 25 para alto-falantes e 5 para ambos (correspondendo apenas 8,06 % da amostra).

Na última fase, para síntese qualitativa, 11 publicações foram selecionadas de acordo com o escopo da dissertação, também, seus estudos se destacaram na apresentação das melhores práticas e contribuições tanto para ACV quanto para alto-falantes, incluindo, a definição e identificação de funções, tipologias, modelos e desafios relacionados e classificados na Tabela 23 do Apêndice A.

Ao término das fases e etapas da RBS, identificou-se a importância do Ecodesign em projetos de produtos como o alto-falante, e a importância da aplicação de ACV sendo extremamente relevante visto a complexidade na sua produção e desenvolvimento. No entanto, até onde sabemos, nenhum relato de resultados empíricos que tenham avaliado e identificado os impactos ambientais no ciclo

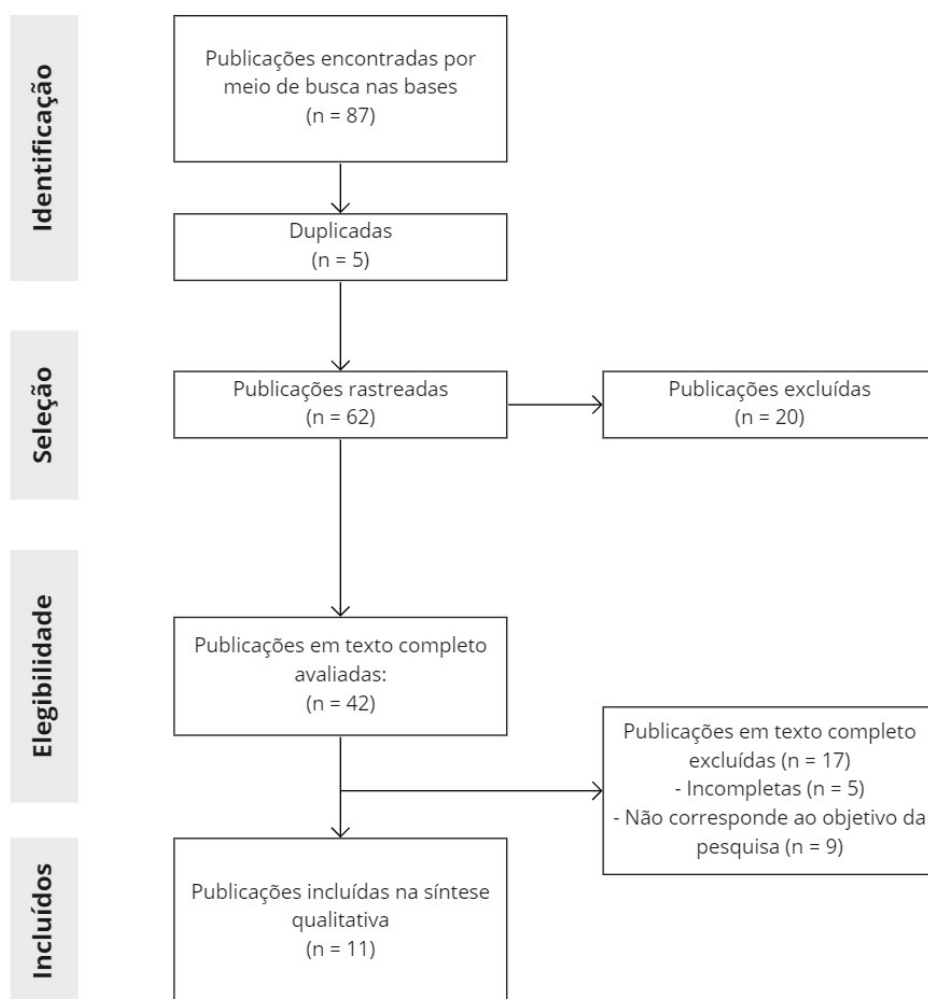


Figura 4 – Fluxograma adaptado do protocolo PRISMA.

de vida do alto-falante para futura aplicação do Ecodesign neste produto pode ser encontrado na literatura. De fato, um levantamento da literatura revela que a maioria dos estudos se limita a avaliar, empiricamente ou teoricamente, os efeitos da poluição sonora nas pessoas, como pode ser visto em (SCHILLER; N.S., 2018; ZENKER; MERCHEL; ALTINSOY, 2019; KURATOMO et al., 2021). Esses estudos são aplicados na fase de uso de alto-falantes, com o viés acústico para melhorar o design do produto. Algumas exceções são (JIN et al., 2016; YANG; WALTON; SHERIDAN, 2017), onde os autores avaliaram os impactos ambientais do ímã de neodímio (material que pode compor uma parte do alto-falante), comparando os impactos ambientais do ímã virgem com o ímã reciclado. Os autores concluíram que o ímã de neodímio reciclado, por exemplo, apresenta menor potencial de impactos ambientais do que o ímã virgem. Sendo assim, se faz relevante e de forma inovadora o estudo completo de todas partes do alto-falante, unindo as duas temáticas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar Ecodesign de um alto-falante, adotamos uma abordagem de dividir e anexar, estratificando todo o produto em processos (A)(C), componentes (B), subsistemas (D) e sistemas (E) menores como exemplificado na Figura 5. Uma vez delimitado o objeto de estudo, a ACV é aplicada a diferentes cenários propostos, visando subsidiar o processo decisório de engenharia e otimizar recursos para viabilizar a prática do Ecodesign em partes da linha de produção. Esta abordagem será útil também, para apoiar o processo de tomada de decisão durante a produção e engenharia de produtos de alto-falantes.

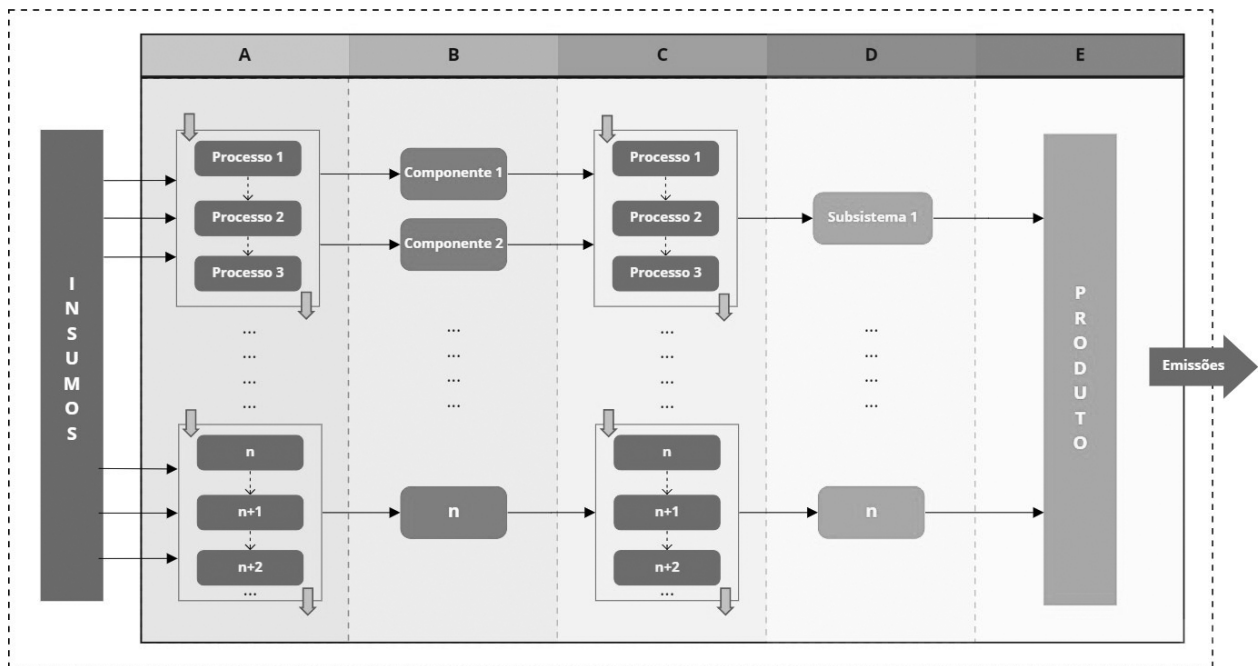


Figura 5 – Estratificação do fluxo produtivo do produto para Ecodesign.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO FABRIL

De forma eficiente e eficaz, projetar um único alto-falante que possa produzir toda a faixa de frequências de áudio de 20 Hz a 20 KHz pode ser uma tarefa complexa. Sendo possível encontrarmos sistemas com apenas um único alto-falante com operação em toda a faixa de frequência mencionada, mas, apresentando degradação em determinadas faixas de operação, muitas vezes excessivamente direcionais em altas frequências. Portanto, a maior parte de sistemas acústicos completos para operação de toda a faixa de frequência é composto por mais de um alto-falante diferente, cada um otimizado para uma parte da faixa audível (WINER, 2018). Das partes que compõe um alto-falante, foi possível identificar e mapear diversas formas e modelos, sendo seu design e materiais de acordo com sua aplicação e nicho. Desta maneira, sua alta complexidade de produção acarretam em desafios para serem implementados em nível industrial, sendo também necessário ser produzido em grande escala para se tornar economicamente atrativo e viável tanto para o consumidor, quanto para o fabricante.

4.2 COMPONENTES

A Figura 6 elucida as componentes presentes em um alto-falante teórico e representativo. Este modelo teórico representa o design mais comercializado, onde encontramos uma série de tamanhos e diferentes materiais que o compõe. Todas as componentes presentes no sistema do alto-falante serão detalhadas no âmbito de sua construção, vantagem e desvantagens, materiais e principais funções a seguir.

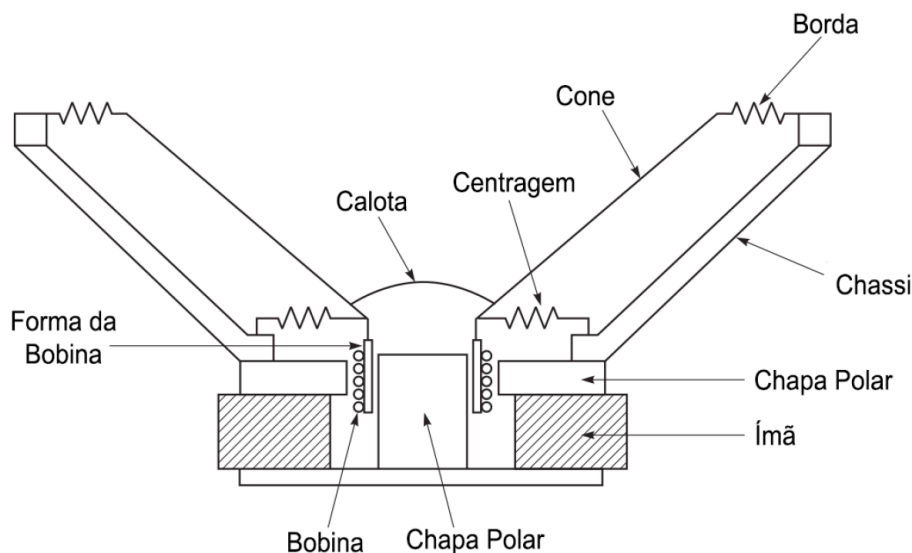


Figura 6 – Seção transversal da representação de um alto-falante.

- **Chapa polar**

A chapa polar foi projetada para conduzir e confinar o fluxo magnético, como ilustrado na Figura 7, a fim de aumentar e posicionar a intensidade de fluxo no *gap* do entreferro, tendo função também de sustentação do alto-falante e fixar o ímã entre as partes. Outro fator importante no design das chapas polares é o de possibilitar refrigeração, dando espaço a circulação do ar para fora do *gap*.

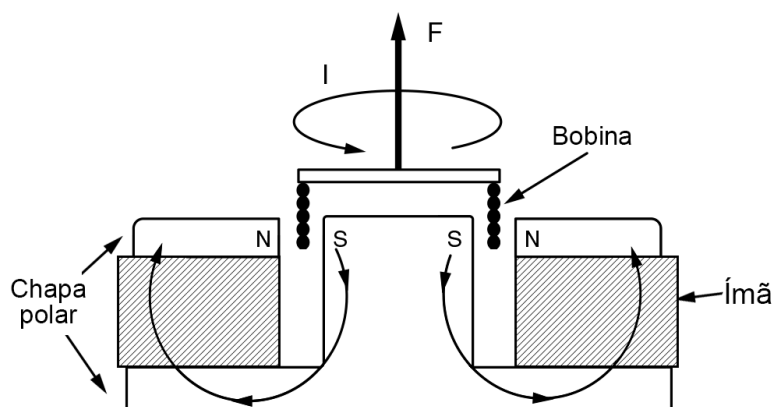


Figura 7 – Seção transversal da chapa polar com as orientações magnéticas (COLLOMS, 2018).

Na indústria, a chapa polar chega em folhas de aço nos quais é realizado o corte a plasma em forma de arruela. O tamanho, quantidade de peças e material, irá depender do modelo do alto-falante. Em seguida, a componente passa pelo processo de usinagem para polimento e furação, finalizando com banho de zinco eletrolítico para proteção contra corrosão e conservação da componente.

- **Ímã**

Estes, são construídos com ímãs permanentes há mais de 50 anos e a evolução do alto-falante seguiu basicamente pelo desenvolvimento de novas tecnologias de ímãs (COEY, 2002). No alto-falante o ímã possui grande importância, tanto em relação ao material e sua fabricação, quanto aos objetivos técnicos do projeto. A primeira evolução ocorreu quando o ímã foi substituído por um ímã permanente de Alnico (alumínio/níquel/cobalto), devido melhores propriedades magnéticas. Estes alto-falantes ainda eram longos e pesados, onde esta mudança em redução física foi com o uso dos ímãs de ferrite (COEY, 1995).

Em projetos com ímãs de ferrite, podemos encontrar falta de homogeneidade na densidade do fluxo magnético que se intensificam conforme o aumento da corrente induzida na bobina do alto-falante, vistos na Figura 8. A presença de ferro em tais motores levam a vários tipos de não linearidades, estes incluem por exemplo, a saturação magnética do ferro, variação da indutância da bobina, orientação da magnetização e da relutância (REMY, 2011).

A presença dos ímãs de neodímio foi o último passo ligado ao progresso dos materiais dos ímãs permanentes, trouxe um salto em relação a miniaturização e também em ganhos como mostrado na Figura 9, onde apresenta as curvas de desmagnetização de materiais magnéticos, no eixo y a

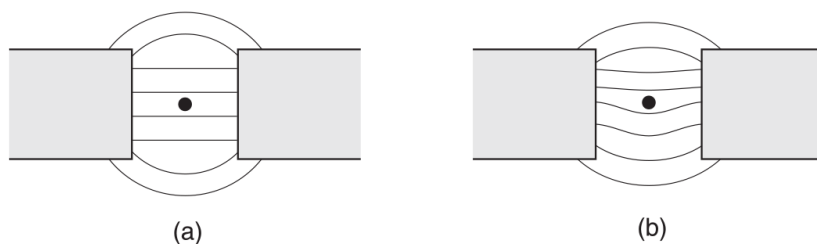


Figura 8 – Linhas representativas da densidade do fluxo magnético, (a) fluxo no *gap* sem corrente induzida pela bobina (b) fluxo com corrente induzida pela bobina (BORWICK, 2001).

densidade de fluxo magnético e o eixo x a intensidade do campo magnético. Sendo o neodímio com melhores resultados, tanto em fluxo quanto na intensidade do campo magnético. Por outro lado, uso de ímãs compostos de neodímio para alto-falantes acabam sofrendo por atingir temperatura elevadas, prejudicando o ímã, visto seu baixo valor de Curie quando comparado aos demais ímãs e também pela sua operação contínua em um espaço restrito, superaquecendo os componentes a sua volta (REMY, 2011) e (COLLOMS, 2018).

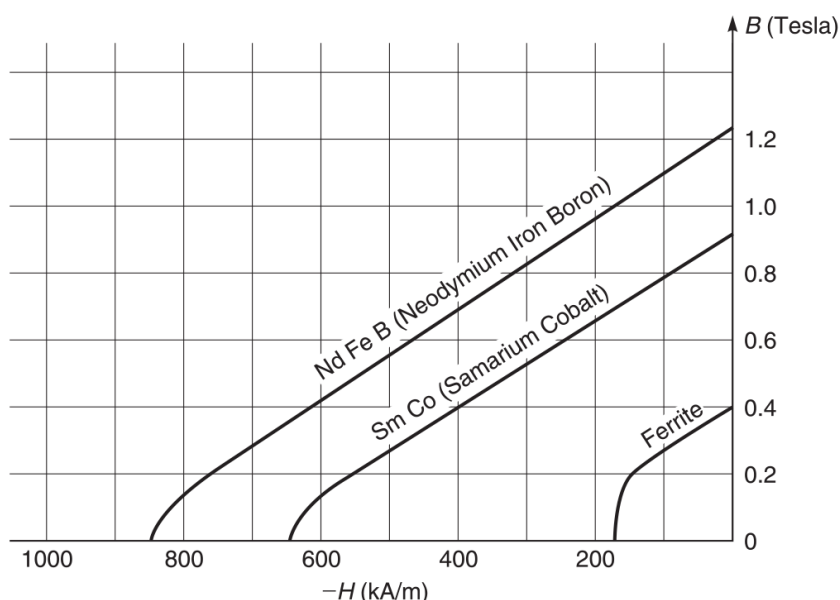


Figura 9 – Curvas de desmagnetização de materiais magnéticos (BORWICK, 2001).

Para a fabricação desta componente e tomando o ímã de ferrite como exemplo, sua construção se inicia na mistura do Óxido Férreo (Fe_2O_3) com Estrôncio (Sr) em partes finas, misturado com aglutinante de cerâmica e depois compactado formando o metal em formato circular com uma abertura central como um anel. Em seguida, é finalizado no forno para curar e sinterizar unindo a mistura. Por fim, é realizada a magnetização se tornando propriamente um ímã para o funcionamento do alto-falante.

• Bobina

A bobina é a parte que produz força motriz ao alto-falante, sendo este o principal objetivo desejado desta componente. Em sua produção, a bobina é enrolada em volta da forma da bobina, como ilustrado na Figura 10, que fica localizada na chapa polar imersa em um espaço chamado

de *gap*, sendo um condutor cilíndrico ou em alguns projetos com condutor quadrado. Em relação ao seu funcionamento, uma corrente alternada gera o deslocamento do conjunto, a força criada na bobina é causada pelo fluxo de corrente interagindo com o campo do ímã e determinando o movimento da bobina.

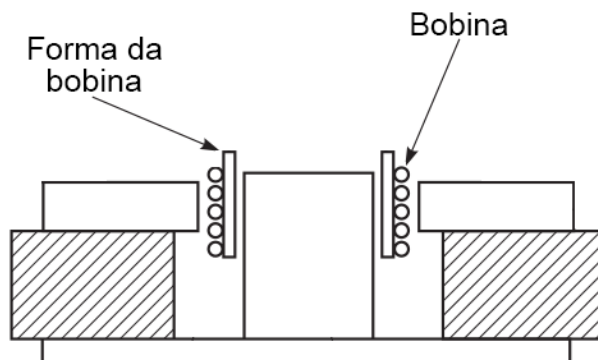


Figura 10 – Seção transversal da bobina e forma da bobina (BORWICK, 2001).

Em relação a suas propriedades físicas, a interação de massa e condutividade da bobina leva a outra abordagem, o cobre tem boa condutividade mas sua gravidade específica é de 8,9, não está muito longe do chumbo com 11,3. Assim, em algumas aplicações, melhores resultados podem ser obtidos com a utilização de alumínio cuja gravidade específica é de apenas 2,7. Embora a condutividade do alumínio seja apenas 60 % do cobre, para alto-falantes maiores onde a massa da bobina é uma parte significativa da massa móvel, uma bobina de alumínio pode proporcionar uma melhoria significativa na eficiência. Entretanto, com o condutor de alumínio ocorrem dificuldades em junções por problemas de oxidação, onde é possível contornar dando-lhe um revestimento de cobre (BORWICK, 2001).

- **Forma da bobina**

A forma da bobina ilustrada na Figura 10, sustenta a bobina e transmite a força motriz causada pela bobina para o restante das componentes anexadas, tendo como objetivo ser rígida, leve e resistente a altas temperaturas. Existem dois tipos de materiais usados em formas de bobinas, os condutores e os não condutores.

As formas condutoras são as mais comuns e simples de serem produzidas, são feitas de folhas finas de alumínio ou Duralumínio. Como o alumínio é um material condutor, desenvolve as chamadas correntes de Foucault, essas correntes causam perdas que se refletem em termos de carga e distorção para o alto-falante.

Já para materiais não condutores, podem ser de papel Kraft, um tipo de papel fabricado a partir de uma mistura de fibras de celulose, mas, não suportam temperaturas superiores a 100°C. Outros modelos de alto-falantes, utilizam NOMEX (poliamida) onde podem suportar temperaturas de até 150 °C, ou então em kapton (poliimida) podendo suportar 350 °C e até mesmo fibra de vidro ou carbono. Materiais não condutores apresentam melhor desempenho por não sofrerem perdas

por correntes parasitas, mas, podem ter maiores custos quando produzidos em larga escala, visto serem materiais de maior valor agregado (DICKASON, 2007).

- **Chassi**

Para o chassi ou também chamado de carcaça do alto-falante, tem como objetivo fornecer pontos de montagem para as demais componentes, suportando principalmente a massa do ímã com a chapa polar de forma rígida. Seu design e material podem afetar as propriedades magnéticas e térmicas do alto-falante, tomando o exemplo da Figura 11, mostra que o cone é apoiado em dois planos. O primeiro plano serve como amortecedor flexível entre o cone e a suspensão do alto-falante. O segundo plano na aranha, sustenta a bobina e o cone.

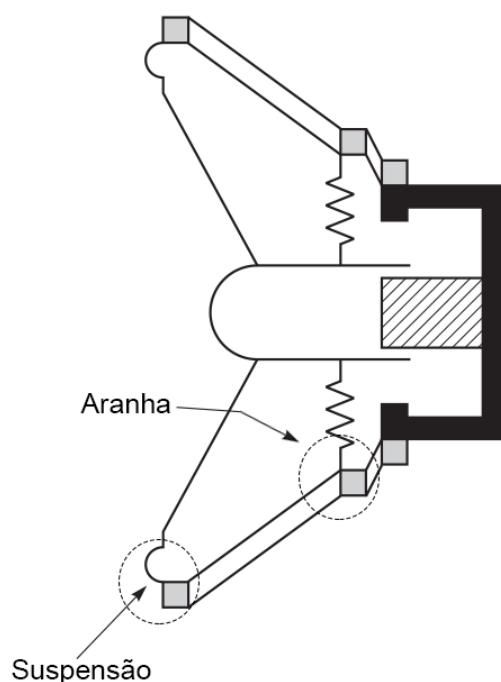


Figura 11 – Seção transversal do chassi do alto-falante (BORWICK, 2001).

Fabricado à partir de uma chapa de alumínio ou aço pré-moldada, em seguida é cortado com uma prensa hidráulica que define o formato e os furos para montagem das componentes. O chassi pode ser fabricado também de outros materiais, sua escolha depende do volume de produção e massa que precisa suportar sem deformar. Ressaltando que na utilização de chassi de material condutor, pode-se apresentar também correntes de Foucault (descrito anteriormente), exigindo um ímã maior para compensar o desempenho esperado (COLLOMS, 2018).

- **Cone**

O cone está localizado dentro do plano da aranha para que ele possa se mover apenas axialmente, uma força linear é fornecida contra o deslocamento do cone mantendo-o no centro de sua faixa de deslocamento. Em relação aos seus materiais, historicamente o papel tem sido o principal material escolhido, originalmente dobrado e costurado, sendo comumente formado pela feltragem da polpa de papel em uma matriz de malha a vácuo e aquecida à vapor para fixá-la. A densidade e rigidez do papel é controlada durante a fabricação, permitindo produzir dentro das características desejadas do projeto. O polipropileno surgiu a partir de inúmeras novas pesquisas, e seu sucesso se deve em grande parte ao seu baixo custo e facilidade na fabricação e no processo de moldagem à vácuo. No entanto, o baixo ponto de fusão do polipropileno o torna inadequado para uso em modelos que demandam altas potências. Outras materiais específicos incluem a fibra de vidro, fibra de grafite carbono, Kevlar e compósitos Nomex (BORWICK, 2001).

- **Aranha**

Como um de seus principais objetivos, a aranha ou também chamado de centragem, possui a função de manter a bobina centralizada sobre a peça polar, como observado na Figura 11, fornecendo também uma vedação e mantendo as partículas externas afastadas da área do *gap*. Outro objetivo, no entanto, é fornecer resiliência para o alto-falante, tornando possível o conjunto retornar a sua posição inicial após a excursão da bobina e do cone (DICKASON, 2007).

Sua aparência como um tecido ondulado geralmente amarelo e seu material na grande maioria, termoformado a partir de algodão impregnado com resina derivada de poliéster. Alguns modelos utilizam misturas de poliéster-algodão, nylons e fibra de aramida (BORWICK, 2001).

- **Suspensão**

A suspensão, localizada no contorno da borda frontal do cone tem objetivo combinado com a aranha de permitir o movimento para dentro e para fora de forma axial, evitando movimentos laterais. O material utilizado para esta componente é comumente termoformado a partir de uma ou mais camadas de poliéster expandido, ou de espuma de poliéter. Outros modelos podem usar também tecido de poliéster-algodão prensado a quente, borracha das famílias IIR (butil) NBR (nitrila) ou SBR (estireno-butadieno). Dois outros materiais, elastômeros termoplásticos (TPE) e uretanos termoplásticos (TPU), podem oferecer benefícios como redução de massa e custo (DICKASON, 2007).

- **Calota**

A calota serve de proteção contra poeira mantendo a bobina e o *gap* livre de contaminantes, fazendo parte também do desempenho acústico do alto-falante, servindo como guia para irradiar altas frequências, ou para suprimi-las, contribuindo com a integridade estrutural do conjunto cone/bobina. No alto-falante, vista como uma cúpula levemente curvada pode ser montada em orientações côncavas ou convexas, mais tipicamente, as calotas são feitas dos mesmos materiais que os cones, portanto, os cones de papel tendem a receber calotas de papel enquanto os de plástico são acoplados a calotas de plástico (BORWICK, 2001).

4.3 UNIÃO DAS COMPONENTES E MATERIAIS

Nas etapas finais da linha de produção do alto-falante, a última se dá pela união das componentes, variando sua complexidade com o tamanho e modelo do alto-falante visto as tecnologias de adesivos necessárias para finalização. Variações na combinação de substratos, geometria, massa e critérios de desempenho exigem que uma ampla gama de tecnologias adesivas seja usada. Na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, são apresentadas de forma detalhada as etapas de união das componentes, materiais presentes nas partes e também os requisitos do adesivo na etapa (LOCTITE, 2000). Sendo estas: (I) ímã nas chapas polares; (II) chapa polar no chassi; (III) aranha na forma da bobina; (IV) forma da bobina no cone; (V) aranha no chassi; (VI) chassi no cone com a suspensão; (VII) calota no cone; (VIII) terminais da bobina; (IX) suspensão na borda(acabamento).

Como desafios para a união das componentes, o longo tempo de cura do adesivo pode ocasionar gargalos em linha de produção, visto que algumas tecnologias nem sempre são monocomponentes e seu tempo tanto de aplicação quanto para liberar à próxima etapa poderá ser considerável. A consistência do material onde é aplicado o adesivo também poderá gerar variações na qualidade e tempo da aplicação, sendo necessário manter a qualidade e padronização da componente, sendo este também um desafio. Como busca por uma solução única, a escolha de adesivos que abrangem a maior quantidade de etapas torna mais eficiente tanto a logística quanto a execução das etapas de produção. A Tabela 6 apresenta os adesivos mais indicados para aplicação nas etapas, recomendado pelos fabricantes em tecnologia de adesivos Henkel e Loctite (LOCTITE, 2000).

Tomando como base a tabela de comparação de adesivos, é possível identificar que algumas tecnologias se repetem em diversas etapas, como o Cianoacrilato, sendo possível otimizar a logística e também processos de produção. Conforme observado, as componentes podem ser compostas por diversos materiais e se faz necessária uma análise e teste unitário para a verificação de compatibilidade do adesivo escolhido, com as características físicas e mecânicas da componente envolvida no processo.

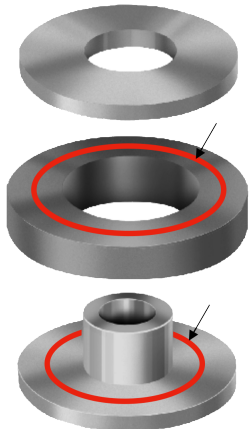
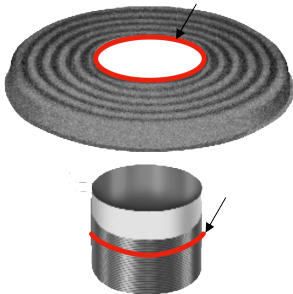
(I)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Chapa polar • Aço carbono Ímã • Ferrite • Neodímio	• Cura rápida • Resistência à flexibilidade, temperatura e impacto
(II)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Chassi • Polipropileno • Mistura PC/ABS • Poliestireno • Aço ou alumínio Chapa polar	• Controle de viscosidade • Resistência à flexibilidade e temperatura
(III)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Aranha • Poliéster • Algodão • Revestido com resina fenólica Forma da bobina • Alumínio & papel • Nomex & papel • Kapton & papel	• Flexibilidade • Fixação rápida

Tabela 3 – União das componentes, etapas I à III.

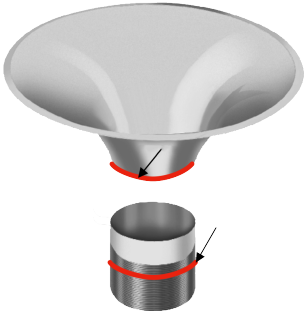
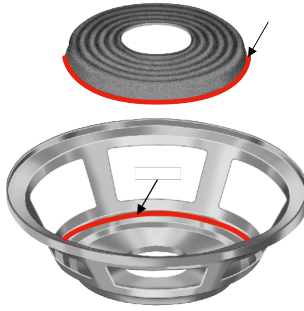
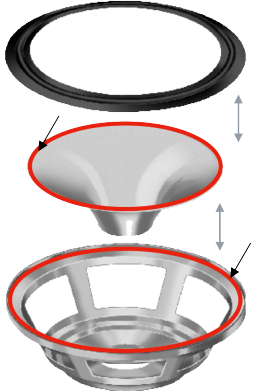
(IV)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Cone • Papel (envernizado) • Polipropileno (mica) • PVC • Alumínio (anodizado) • Magnésio • Kevlar Forma da bobina	• Flexibilidade • Fixação rápida
(V)	MATERIAIS	REQUISITOS
	• Aranha • Chassi	• Flexibilidade • Fixação rápida • Resistência à temperatura
(VI)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Suspensão • Borracha EPDM • Polipropileno • Linho PS • Borracha de neoprene • Mistura de borra-cha/espuma Forma da bobina + Cone	• Fixação rápida

Tabela 4 – União das componentes, etapas III à VI.

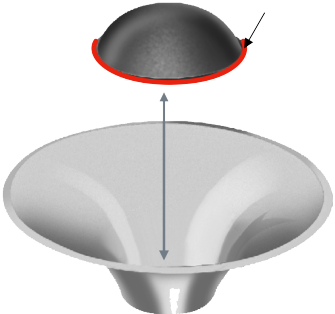
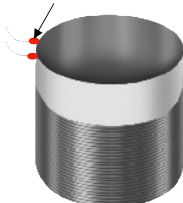
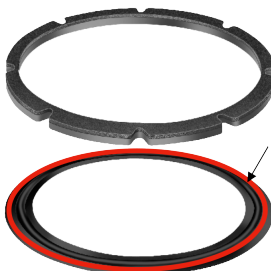
(VII)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Calota • Papel • Linho • Algodão • Polipropileno • Titânio Cone + Forma da Bobina	• Resistência à impacto • Fixação rápida
(VIII)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Bobina • Alumínio • Cobre • Berílio Forma da bobina	• Fixação rápida
(IX)	MATERIAIS	REQUISITOS
	Borda/Acabamento • Papel laminado • Espuma de poliéter • Policloropreno • Noryl • ABS ou ABS/PC Suspensão	• Fixação rápida

Tabela 5 – União das componentes, etapas VI à IX.

Tabela 6 – Comparação de adesivos para etapas de união das componentes.

APLICAÇÃO	Cianoacrilato	Poliuretano	Poliamida	Fotopoli- merizável	Acrílico 2K	Epóxi	Silicone	SMP
Chassi Suspensão	✓	✓	✓				✓	✓
Cone Calota Bobina	✓	✓	✓	✓				
Cone Suspensão Chassi	✓	✓	✓					
Cone Suspensão	✓	✓	✓					
Cone Bobina	✓	✓	✓	✓		✓		
Terminal do fio da bobina	✓	✓	✓	✓				
Aranha Chassi	✓	✓	✓		✓	✓		
Aranha Bobina	✓	✓	✓	✓				
Chapa polar Chassi	✓	✓			✓	✓		
Ímã Chapa polar	✓	✓			✓	✓		

4.4 MODELO EM PRODUÇÃO

Após a realização da revisão bibliográfica sistemática, foi identificada uma escassez de publicações aplicadas a produção de alto-falantes, esta ausência é notória por motivos de sigilo industrial e competição de mercado. Desta forma, tornando pouco assertivo o entendimento para a concretização de toda a ACV, sendo necessário detalhes de todos os processos de fabricação do alto-falante. Com este parecer e com os objetivos da dissertação, se fez plausível a parceria com indústrias do ramo para compreender de forma qualitativa e quantitativa todos os processos de forma assertiva para a ACV.

Sendo assim, foi possível estabelecer e concretizar uma parceria entre a empresa Harman e o Center for Advanced and Sustainable Technologies (CAST) da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" do Campus São João da Boa Vista/SP. Todos os dados de produção, etapa, processos, serão coletados em detalhes diretamente na fábrica a partir de um alto-falante em linha de produção. Vale ressaltar que dados sensíveis foram omitidos e resguardados pelo contrato de confidencialidade firmado entre as partes, revisado antes de sua divulgação.

4.4.1 Informações comerciais

A escolha do alto-falante modelo para a ACV e Ecodesign foi realizada pela empresa, a motivação da escolha deste modelo em específico foi estabelecido por estar em produção com estrutura bem consolidada. Este modelo possui também a menor quantidade de materiais e partes terceirizadas, tornando possível coletar dados à nível elementar, obtendo detalhes dos processos e materiais de forma direta e primária. Pelo relatório técnico do produto, a Figura 12 ilustra as vistas frontais e laterais do modelo em questão, em seguida a Tabela 7 lista suas dimensões.

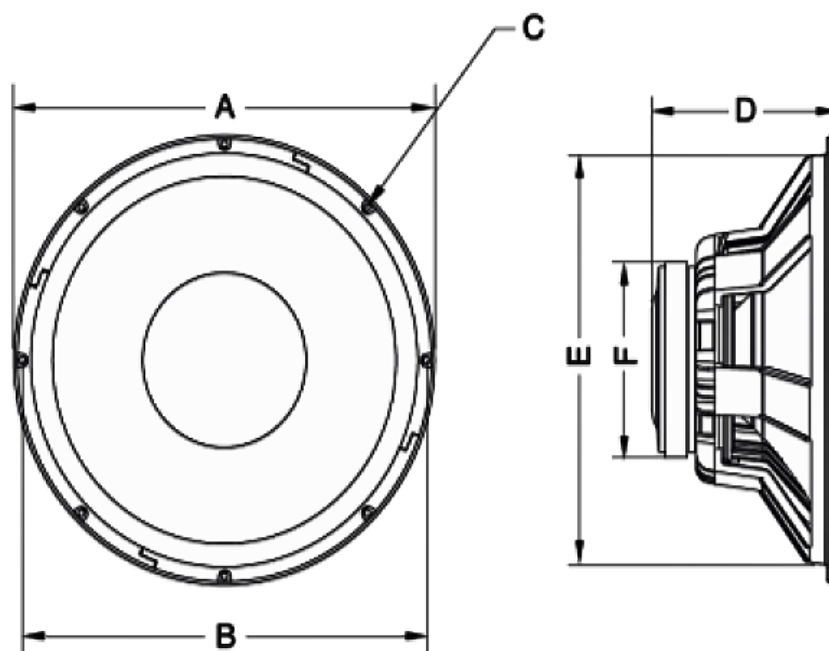


Figura 12 – Vistas frontais e laterais do alto-falante.

Tabela 7 – Dimensões do alto-falante.

DIMENSÃO	VALOR	UNIDADE
A	306	mm
B	292	mm
C	5,5x8	mm
D	121	mm
E	280	mm
F	147	mm

A análise preliminar deste modelo se dá nos documentos encontrados na literatura, neste caso no próprio *datasheet* disponível no site do fabricante, podemos extrair algumas informações para compreender melhor as características e aplicações deste modelo.

Tabela 8 – Informações técnicas do alto-falante.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Diâmetro nominal	305 (12")	mm(in)
Impedância nominal	4	Ohms
Potência PEAK	1000	W
Potência RMS	500	W
Sensibilidade	94	dB
Resposta de frequência	70 à 5000	Hz
Peso do conjunto magnético	3200	g
Peso líquido	3876	g

A Tabela 8 é considerada padrão na indústria de alto-falantes, sendo largamente encontrada em outros produtos comerciais. O entendimento destes parâmetros se faz necessário para compreender se determinado produto é melhor em uma aplicação ou inferior em outra, no caso da ACV, para estipularmos patamares de comparação e principalmente para definir a unidade funcional. Como principais informações a serem observadas na Tabela 8: o **Diâmetro nominal** especifica a largura total do alto-falante; a **Impedância nominal** é utilizada para casamento de impedância com amplificadores ou outros alto-falantes; **Potência PEAK** ou PMPO (do inglês, Peak Music Power Output) define o pico máximo de potência que o alto-falante pode atingir; potência RMS (do inglês, *Root Mean Square*) determina valores médios de potência de operação do alto-falante; a **Sensibilidade** expressa em dB, sendo a pressão sonora medida a 1 m da frente do alto-falante quando a potência de entrada é de 1W; a **Resposta de frequência** indica a banda de operação do alto-falante; o **Peso do conjunto magnético** determina o peso das chapas polares em conjunto com o ímã; **Peso líquido** apresenta o peso total do alto-falante incluindo todas as suas componentes.

Com os parâmetros descritos anteriormente, é possível identificar qual a destinação e sistema que este alto-falante foi proposto. Pela resposta de frequência, a faixa determinada é de 70 Hz á 5000 Hz, sendo necessário adicionar outros modelos de alto-falante em conjunto para preencher o restante da banda audível. Pela Impedância nominal e a potência RMS, conseguimos também determinar o casamento de impedância com o amplificador de áudio e a potência que esse amplificador precisará operar. Para a sensibilidade, quanto maior for o valor mais eficiente é o alto-falante, sendo esta grandeza relevante para comparações entre alto-falantes.

4.4.2 Parâmetros eletromecânicos

Parâmetros Thiele/Small (parâmetros T/S comumente abreviados, ou TSP) são conjuntos de parâmetros eletromecânicos que descrevem o desempenho de um alto-falante. São nomeados em homenagem a A. Neville Thiele da Australian Broadcasting Commission, e Richard H. Small da Universidade de Sydney, que foram os pioneiros nesta linha de análise para alto-falantes. Esses parâmetros são publicados em *datasheets* pelos fabricantes de alto-falantes, para que se tenha um

guia para projetar sistemas completos. Analisando estes parâmetros, podem-se simular diversos comportamentos do alto-falante e também estabelecer alguns indicadores como a posição, velocidade e aceleração de algumas componentes.

Tabela 9 – Parâmetros Thiele/Small do alto-falante.

PARÂMETROS TSP	VALOR	UNIDADE
Fs	70,3	Hz
Re	4,43	Ohms
Qms	10,675	-
Qes	0,93	-
Qts	0,85	-
Vas	46,66	L
Eff	1,67	%
Sd	0,0531	m ³
Vd	146	cm ³
Xmáx	2,75	mm
BI	9,59	T.m

Os valores descritos na Tabela 9, representam as características do alto-falante nos domínios mecânico, acústico e elétrico, são comumente determinados através de impedâncias elétricas dependentes da frequência, medidas nos terminais do alto-falante. No entanto, por se tratar de dispositivo eletromecânico, deve-se medir seus parâmetros através de outros domínios físicos. Para entendimento dos parâmetros da Tabela 9, será descrita a definição de cada um deles a seguir:

- Fs: Determina a frequência de ressonância ao ar livre, em que o alto-falante se move com o mínimo de esforço;
- Re: Resistência DC da bobina do alto-falante;
- Qms: Fator de qualidade mecânica;
- Qes: Fator de qualidade elétrica;
- Qts: Fator de qualidade total do sistema;
- Vas: Volume de ar com a mesma complacência acústica que a suspensão do alto-falante;
- Eff: Eficiência de referência;
- Vd: Volume de deslocamento de pico;
- Xmáx: Deslocamento linear de pico;

- Bl : Força do conjunto motor, o produto de B (Densidade de fluxo magnético) e l (Comprimento da bobina no entreferro magnético).

Os softwares de modelagem acústica realizam parte da interpretação e cálculo dos parâmetros TSP citados acima, na modelagem, alterar um valor pode afetar vários outros parâmetros, não sendo direto e equivalente. Mudanças ocorrem em meio físico, como por exemplo a quantidade de espiras da bobina, espessura do cone e até mesmo o material do chassi. Os cálculos e detalhamento destes parâmetros fogem do escopo desta dissertação, para o aprofundamento sobre o tema recomenda-se a leitura das referências (DICKASON, 2007) e (COLLOMS, 2018).

4.5 PROCEDIMENTOS PARA ACV

Existem normas que orientam e conciliam o contexto de melhoria dos aspectos ambientais relacionados às atividades de produção. Essas normas incluem plano de tomada de decisão que contribuem para a prevenção de impactos ambientais. A série ISO 14000 trata do que a organização deve fazer para minimizar os efeitos nocivos ao meio ambiente causados por suas atividades. Conforme mostrado na Tabela 10, a série ISO 14040 em específico descreve os detalhes do processo da ACV, desenvolvendo uma estrutura geral e orientando a preparação de cada fase.

Tabela 10 – Normas ISO - Avaliação do Ciclo de Vida.

ISO: ANO	DESCRIÇÃO
14040:1999	Princípios e Estruturas
14041:1998	Objetivos e escopo, definições e análise de inventários
14042:2000	Avaliação de impacto do ciclo de vida
ISO/TR 14043:2000	Interpretação dos resultados de um estudo ACV
ISO/TS 14048:2002	Informações sobre o envio de dados para um estudo ACV
ISO/TR 14049:2002	Exemplos de aplicação da norma ISO 14041:1998
ISO 14040:2016	Princípios e estruturas (atualizado)

As fases da ACV desta pesquisa foram conduzidas de acordo com a norma ISO 14040 ilustrada na forma de diagrama pela Figura 13, após a definição do objetivo e escopo da pesquisa, é realizada a coleta de fichas técnicas e de documentos que nesta pesquisa foram fornecidas pela empresa, sendo a primeira fase do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) (GUINÉE; GORRÉE; HEIJUNGS, 2002). Para a segunda fase, o software GaBi Professional (amplamente utilizado para modelagem ACV) com pacotes adicionais fornecidos pela universidade, foi utilizado afim de realizar a análise do inventário e Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV).

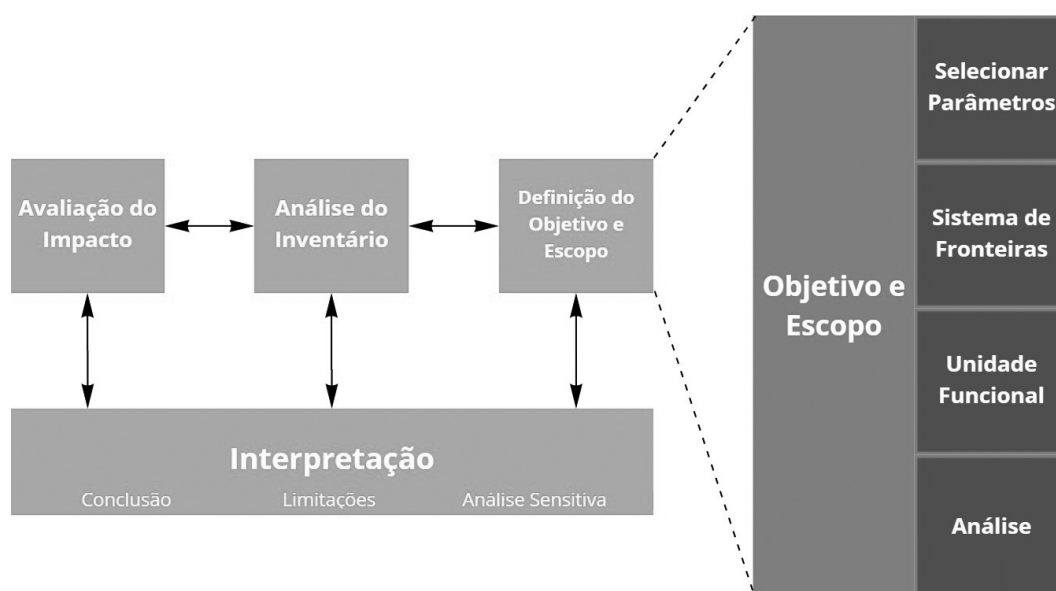


Figura 13 – Fluxo de fases da ACV.

4.6 ESCOPO DA ACV

Para a ACV, é necessário que o escopo seja bem definido para assegurar que a extensão e o grau de detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo estabelecido. Sendo a ACV uma técnica iterativa e cíclica, portanto, o escopo do estudo pode necessitar de modificação enquanto o estudo estiver sendo conduzido.

4.6.1 Escolha dos parâmetros

Pela NBR ISO 14040, os parâmetros definidos para a ACV possibilitarão avaliar os impactos ambientais dos cenários propostos. Sendo estes, realizados pela segmentação do sistema e na análise de forma individual para cada componente do alto-falante que integra o produto, sendo apresentados seus materiais, quantidades e processos. Para a padronização externa, foi definido como base para a AICV a metodologia TRACI 2.1, uma ferramenta de avaliação de impacto ambiental que fornece fatores de caracterização para AICV, ecologia industrial e métricas de sustentabilidade para tomada de decisão, buscando minimizar os impactos negativos e equilibrando fatores ambientais. A escolha desta metodologia se fez por suas normalizações serem baseadas em variáveis da América do Norte, que abrange os países mais representativos do mercado de alto-falantes e geograficamente similar à América do Sul (se comparada com metodologias europeias). A Tabela 11 apresenta as categorias de impacto da metodologia TRACI 2.1.

Tabela 11 – Categorias de impacto TRACI 2.1.

CATEGORIA	ACRÔNIMO	UNIDADE
Potencial de aquecimento global, excl. carbono biogênico	GWP I	kg CO ₂ eq.
Potencial de aquecimento global, incl. carbono biogênico	GWP II	kg CO ₂ eq.
Smog (poluição)	Smog	kg O ₃ eq.
Recursos, combustíveis fósseis	Comb. Fósseis	MJ
Toxicidade humana, não-cancerígeno	HTnC	CTUh
Toxicidade humana, cancerígeno	HTC	CTUh
Toxicidade humana, particulado	HHP	kg PM2.5 eq.
Ecotoxicidade	Ecotox	CTUe
Depleção da camada de ozônio	OD	kg CFC 11 eq.
Eutrofização	Eu	kg N eq.
Acidificação	Ac	kg SO ₂ eq.

De forma geral, a seguir serão descritas as definições das categorias da Tabela 11 para a contextualização na interpretação dos resultados.

- Segundo (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997), o potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Potential*) é causado principalmente pela queima de combustíveis fósseis, quando as substâncias resultantes da queima são absorvidas pela radiação infravermelha e se estabilizam na atmosfera (IPCC, 2007). Esta categoria de impacto é responsável pelo aquecimento acelerado e mudança repentina de temperatura no globo. Na metodologia adotada, esta categoria de impacto é separada em duas, sendo a primeira com a exclusão do carbono biogênico e a outra com a inclusão. Segundo o Programa Brasileiro GHG Protocol, algumas atividades antrópicas emitem CO₂ por conta da transformação de estoques biológicos de carbono como exemplo, vegetais, animais e algas. O carbono presente em tais estoques biológicos foi removido da atmosfera através da fotossíntese, logo estas emissões não possuem impacto adicional na concentração deste GWP na atmosfera. Por este motivo, as emissões de CO₂ biogênico devem ser contabilizadas de maneira separada, pois possuem impacto adicional nas concentrações de GWP na atmosfera.
- A acidificação (Ac - *Acidification*) é causada pela emissão de poluentes gasosos, sólidos ou líquidos, que atingem o ar, a água e o solo, resultantes principalmente das atividades e da combustão nos processos de geração de energia, sejam elétricas ou térmicas. Neste caso, os poluentes estão introduzindo ou liberando íons de hidrogênio no ambiente, e os ânions (que acompanham os íons de hidrogênio) são lixiviados ou lavados do sistema (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).
- A eutrofização (Eu - *Eutrophication*) é responsável por uma quantidade excessiva de nutrientes em um meio em que os principais nutrientes são à base de nitrogênio, fósforo e potássio. De

acordo com (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997), a eutrofização pode ser causada principalmente por emissões no ar (por exemplo, óxidos de nitrogênio de processos de combustão), água (por exemplo, nitrogênio no ambiente aquático proveniente do uso de fertilizantes na agricultura) dentro e sobre o solo (por exemplo, emissões de fósforo lixiviado no solo de fontes agrícolas).

- A depleção da camada de ozônio (OD - *Ozone Depletion*) é causada especialmente por emissões humanas de halocarbonos e gases em temperaturas atmosféricas normais, como substâncias refrigerantes, solventes e agentes espumantes contendo cloro ou bromo. Em particular, substâncias refrigerantes são especialmente prejudiciais pois ainda são comumente usadas em ciclos de calor para maior eficiência, uma transição de fase reversível de líquido para gás (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).
- Segundo (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997), a ecotoxicidade (Ecotox - *Ecotoxicity*) é causada pela emissão de substâncias tóxicas na biosfera onde afeta espécies da flora e fauna, causando toxicidade em suas espécies, que por sua vez pode ser bioacumulativa. A ecotoxicidade é quantificada em ecotoxicidade comparativa de unidades tóxicas (CTUe - *Comparative Toxic Units*).
- A toxicidade humana particulada (HHP - *Particulate Human Toxicity*) está associada a micropartículas que causam problemas de saúde. As micropartículas têm menos de 10 micrômetros de diâmetro e podem penetrar profundamente nos pulmões, e algumas podem até entrar na corrente sanguínea. Portanto, essas partículas podem afetar os pulmões e o coração humano onde pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, crianças e idosos são os mais propensos a serem afetados pela exposição à poluição por partículas (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).
- Medida em unidade tóxica comparativa para humanos (CTUh - *Comparative Toxic Unit*), a toxicidade humana (HTc - *Human Toxicity*) pode ser dividida em duas categorias principais dependendo se é suscetível a causar câncer ou não. A toxicidade humana cancerígena, é induzida por substâncias químicas emitidas que são ingeridas ou inaladas por humanos, e essas substâncias podem causar câncer. A toxicidade humana, não cancerosa, também é causada pela ingestão ou inalação de substâncias químicas emitidas ao meio ambiente pelas atividades humanas, mas que causam outros danos ao ser humano, exceto o câncer (GUINÉE; GORRÉE; HEIJUNGS, 2002)
- De acordo com (GUINÉE; GORRÉE; HEIJUNGS, 2002), existe a formação troposférica de ozônio, também chamada de formação de *Smog* (poluição), que é a formação de ozônio, como um poluente secundário, decorrente da reação química entre óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis, na presença de luz solar. Esses gases são gerados principalmente por concessionárias de energia elétrica, instalações industriais e motores de combustão. O *Smog* causa diversas doenças respiratórias, como bronquite, asma e enfisema e os impactos ecológicos incluem o esgotamento nos ecossistemas dos mesmos (EPA, 2020).
- O esgotamento de recursos, combustíveis fósseis é uma questão extremamente importante para o uso e desenvolvimento de métricas de sustentabilidade e metodologias de ACV. Sendo uma

das questões mais difíceis de quantificar, todas as categorias descritas anteriormente possuem legislação ou acordos internacionais relacionados ao seu controle, existentes para destino, transporte e grau para cada categoria de impacto. A categoria aborda o uso de combustível fóssil, uso da terra e uso da água especificando localidade (EPA, 2020).

4.6.2 Sistema de fronteiras

Para as fronteiras do sistema, são determinadas quais unidades de processo devem ser incluídas na ACV, como limitações de acesso aos dados, aplicação pretendida do estudo e critérios de corte. Sendo também a escolha das entradas e saídas e nível de agregação dos dados, modelados como fluxos elementares. Estes fluxos serão mapeados e descritos no capítulo seguinte, onde foram inseridos na modelagem como produto acabado (componente finalizada pós processo), refugo (sobras e descarte) e entradas (quantidade total para produzir a componente). As fronteiras gerais se restringiram à *cradle-to-gate*, em outras palavras, desde a extração e requisição de materiais envolvidos nos processos de manufatura do alto-falante, não sendo analisado neste escopo as fases seguintes, fase de uso e fase EOL (*End Of Life*).

4.6.3 Unidade funcional

A unidade funcional é uma medida do desempenho de saída funcional de um sistema de produto, sendo o objetivo principal, de fornecer referências a entradas e saídas inter-relacionadas. A comparabilidade dos resultados da ACV é particularmente importante ao avaliar diferentes sistemas para garantir que tais comparações sejam feitas em uma base comum (ABNT, 2009a). Para que futuros cenários possam ser estudados (projetos de Ecodesign) com funcionalidades aproximadas e possam ser considerados equivalentes para fins de padronização, a definição de uma unidade funcional foi adotada para modelos de alto-falantes de 12 polegadas com sensibilidade acústica de 94 dB e 3895,58 g de peso. O fluxo de referência para este produto é a produção de 3895,58 g distribuídos entre seus subsistemas componentes, considerados como produto acabado.

4.6.4 Qualidade dos dados

De acordo com (ABNT, 2009a), os requisitos da qualidade dos dados devem ser definidos para possibilitar que os objetivos e o escopo do estudo da ACV sejam alcançados. O período de tempo coberto foi de 24 meses; área geográfica coberta localizada no Brasil/RS; precisão, completeza e representatividades dos dados foram completos com dados diretos e primários na produção do produto; fontes de dados foram definidas ao longo da pesquisa; a consistência e reprodutibilidade dos métodos usados ao longo da ACV é possível pela base de dados global do software GaBi; incertezas das informações foram recorridas a outras bases de dados.

4.7 CRONOGRAMA E PLANO DE AÇÃO

O cronograma segue a ordem e o plano de ação estipulados basicamente pela (ABNT, 2009a), contendo ajustes a fim de alinhar os requisitos para a modelagem da produção do alto-falante escolhido

pela empresa. Foram levadas em consideração todas etapas de produção, desde a extração da matéria prima, fabricação dos componentes e a união para o produto acabado. Com a separação das atividades previstas no cronograma em etapas, pôde-se criar um plano de ação mais eficiente com ajustes de prazo flexíveis, monitorando o andamento de cada atividade visto o prazo da etapa que se encontra. Uma breve explicação das atividades planejadas e desempenhadas são apresentadas, em dez etapas a seguir:

- (i) Ajustes e consolidação do tema, como a definição da linha de pesquisa de acordo com a necessidade da empresa e o entendimento completo por ambas as partes.
- (ii) Após a consolidação do projeto, foi definido o escopo do estudo, visando como principal foco a forma de realizar a modelagem do sistema pela coleta de dados primária, sendo um processo cíclico, podendo ser ajustado ao longo do andamento das etapas subsequentes se retroalimentando. Neste momento foi definido o objetivo do projeto, a unidade funcional, o sistema de produto, o fluxo de referência, os critérios de corte e as categorias AICV.
- (iii) Após o escopo, iniciou-se a coleta e levantamento dos materiais e processos necessários, sendo de extrema importância devido ao grau de assertividade esperado para o resultado final. Nesta etapa foram quantificadas todas as entradas e saídas de matéria e energia dos processos e subprocessos definidos na fronteira do sistema do produto.
- (iv) Modelado o sistema de produto com o uso do software GaBi. O laboratório da UNESP/CAST possui recursos e licença para versão completa do software.
- (v) Após modelado o sistema de produto e seus fluxos de matéria e energia, avaliado e projetado a ICV.
- (vi) Estando validado o modelo, foram calculados os potenciais de impactos para cada etapa do ciclo de vida do alto-falante, a AICV.
- (vii) Análise e interpretação dos resultados, feitas para cada componente e também do sistema completo.
- (viii) Projeção de cenários para melhoria ambiental do produto, uma das ferramentas com o uso da técnica ACV foi projetar cenários diversos contendo opções para a melhoria do desempenho ambiental do produto.
- (ix) Apresentação dos cenários, visando avaliar-se previamente qual ou quais cenários são mais interessantes e também uma análise preliminar da viabilidade tecnológica, ambiental e econômica destes cenários à luz de sua implementação real.
- (x) Proposta de Ecodesign e considerações finais.

4.8 MODELAGEM

Após o recebimento de todos os dados necessários para iniciar o inventário do produto, foi realizada a verificação e o levantamento no banco de dados do software GaBi para consultar documentações e a

disponibilidade dos mesmos. Devido as bases de dados das plataformas estarem em contínua expansão e contribuições, se torna complexo conseguir todos os processos necessários para a modelagem completa do alto-falante de forma direta. Desta maneira, se fez necessário a criação de fluxos e processos exclusivos para alcançar entradas e saídas idênticas as realizadas na fábrica. De forma direta, para todas as componentes foram levantados 56 materiais desde: ligas metálicas; compósitos; polímeros; adesivos e tintas. Em seguida abertos em 91 ingredientes com auxílio das documentações FISPQ (Ficha de Segurança de Produtos Químicos). Substâncias específicas que não foram possível encontrar ou adicionar à base de dados do software, foram substituídas por equivalentes químicos afim de não suprimir a concentração e função do fluxo em construção, casos isolados de apenas 9 % do total de ingredientes, ligados a composição do Corante Azo e da tinta Laca Nitrocelulose.

Como resultado direto da modelagem, foram obtidos dados de quatro metodologias, mas a análise será restrita à metodologia TRACI 2.1 como descrito no capítulo anterior. No mesmo sentido, as normalizações internas e externas foram realizadas de acordo com esta metodologia. A normalização interna foi realizada dentro do mesmo cenário, onde foi avaliado o impacto total em cada categoria de impacto ambiental e calculado o potencial relativo de cada componente do alto-falante e para todas as categorias. A normalização externa foi realizada de acordo com:

$$NF_i = \frac{\sum CF_{i,s} \cdot E_s}{P} \quad (1)$$

Onde:

- NF_i é o fator de normalização ($\text{impacto capita}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para categoria de impacto i ;
- $CF_{i,s}$ é o fator de caracterização ($\text{kg de impacto}^{-1}$ emitido de uma determinada substância s para a categoria de impacto i);
- E_s são as emissões de substâncias para uma determinada área geográfica de referência (kg ano^{-1}). Neste estudo foi empregada a população dos EUA e EUA-CA; e
- P é a população humana da área de referência (capita).

Para mais detalhes da metodologia de normalização, o leitor deve consultar (LAUTIER et al., 2010) e (RYBERG et al., 2014).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a (ABNT, 2009a), é definido um procedimento sistemático para identificar, qualificar, verificar e avaliar os resultados do ICV ou da AICV, facilitando a interpretação da mesma. Após a consolidação de todo o escopo, em comum acordo com a empresa, inicia-se o recebimento dos dados colhidos em linha de produção, onde o autor recebeu de forma gradativa seguindo a ordem de produção. Fizeram necessárias reuniões periódicas no início do cronograma, próximo ao término, comutando para reuniões semanais afim de alinhar os detalhes finais da ACV.

5.1 TRANSPORTE

Para a fase de transporte, foi realizado o contato e levantamento com os fornecedores da empresa para mensurar a mapear a aquisição dos materiais, onde inclui o transporte e deslocamento das principais matérias-primas. A maioria dos materiais, como as ligas metálicas, por exemplo, são fornecidos por empresas regionais. Como o transporte de materiais causa uma parcela nas emissões do ciclo de vida do produto, será considerado em todas as etapas que houver assim como transportes in loco.

5.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Como parte da coleta de dados para a modelagem completa da ACV, é necessário a aplicação de métodos para quantificação do consumo elétrico, onde será relacionado a análise final. A coleta de dados se faz de forma direta (coleta de dados primária) com a planta em produção sem interferir ou sofrer interferência, também, de forma indireta (coleta de dados secundária) com cálculos e aproximações originados de documentos e manuais técnicos dos equipamentos encontrados. A coleta é realizada em partes, levando em conta a ordem e os processos de produção de cada componente. São os equipamentos: aplicadores de tinta; bombas pneumáticas; sopradores; motores; exaustores; equipamentos de transporte; esteira distribuidora; máquinas de corte; máquinas de molde; máquinas CNC; imantador magnético e forno elétrico.

Os dados aferidos contêm detalhes para a modelagem e documentação da ACV, como: componente a que se refere, descrição do processo, local, equipamento, modelo, tempo de utilização, corrente, tensão, potência instantânea, potência esperada, variações de tempo e potência, hora da coleta, qualidade do equipamento e da coleta. Quando necessário e possível, feitas três medições para cálculo de dispersão e de precisão (desvio e erro padrão).

5.3 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Diferente da literatura, na indústria de alto-falantes algumas componentes são agrupadas e tratadas como subsistemas e chamadas de conjunto. Esta definição se faz pela sua ordem de fabricação, facilidade na modificação do projeto e testes realizados em produção. Alguns destes conjuntos são fabricados em paralelo onde se juntam a outras componentes nas etapas finais de produção, como exemplificado na Figura 14.

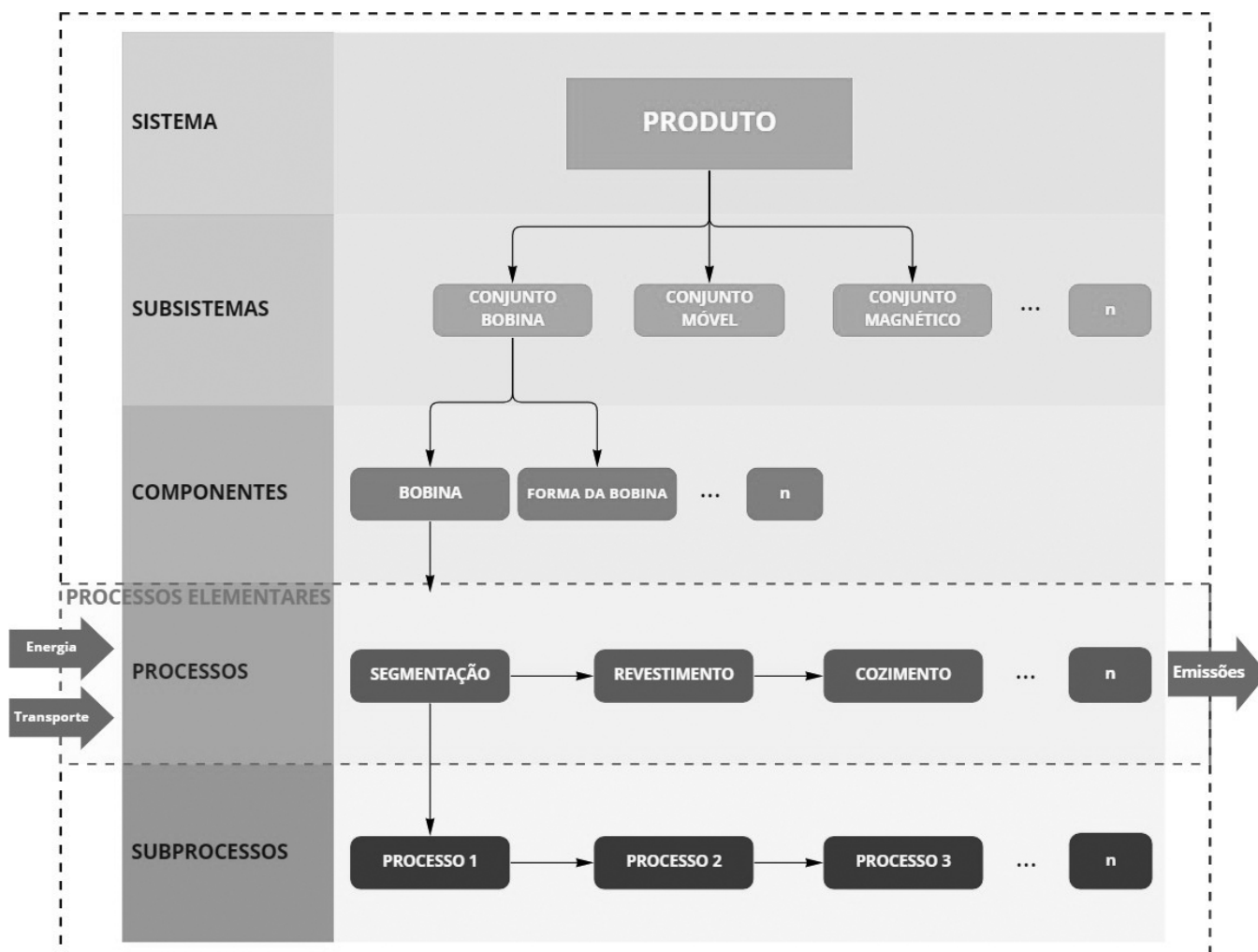


Figura 14 – Segmentação das etapas e processos de produção de um alto-falante.

Podemos observar também a segmentação realizada do produto final até seus subprocessos, onde sua ramificação chega a nível elementar contendo todas suas entradas e saídas mapeadas para cada etapa de produção. Nas subseções abaixo, serão fracionadas e descritas as entradas para cada componente e conjunto. A análise do inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Estes dados constituem a entrada para a avaliação do impacto do ciclo de vida. O inventário compilado com entradas detalhadas e as saídas estão dispostas no material complementar, se fez necessário essa compactação ressaltando apenas os *Hotspots* devido o grande volume de dados gerados (863 saídas para cada componente/conjunto). Seguindo a mesma estrutura do escopo, a condução da análise do inventário é de forma iterativa, a medida que os dados são adquiridos e o conhecimento acerca do sistema aumenta, pode-se identificar

novos requisitos ou limitações.

5.3.1 Conjunto magnético

A cadeia de produção do conjunto magnético do alto-falante é composta pela produção da chapa polar e a produção do ímã separadamente. Nesta subseção, será apresentada uma descrição detalhada do inventário e dos processos. Na próxima seção serão apresentados os potenciais de impactos ambientais gerados pela a produção das duas componentes em conjunto. Os dados da produção para os materiais e quantidades são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Informações de produção do conjunto magnético.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Ímã	Anel de ferrite	Ferrite	0	1200
Chapa polar	Arruela aberta	Ferro	284	816
Chapa polar	Arruela fechada	Ferro	136	914
Chapa polar	Entreferro	Ferro	127	223
Adesivo	Adesivo parte A	Acrílico bicomponente	0	1,13
Adesivo	Adesivo parte B	Acrílico bicomponente	0	1,13
Chapa polar	Calota acabada	Alumínio	1	4

O conjunto magnético, representa 82,52 % do peso total do alto-falante, sendo 3159,26 g o peso do conjunto acabado, a maior parcela dentre todas as componentes e conjuntos. Para a sobra, também neste conjunto apresenta a maior parcela. O processo se dá por etapas aprofundadas na Figura 22, em detalhes, é aplicado o adesivo bicomponente na base da chapa polar e adicionado o ferrite por cima da peça, onde é aplicada uma nova camada de adesivo. Por fim é adicionada a chapa polar aberta superior por cima do ferrite e encaminhado para uma esteira e reservado para a etapa de união das componentes.

5.3.2 Conjunto bobina

Similar ao conjunto magnético, a produção do conjunto bobina do alto-falante é composta também por duas componentes, sendo uma delas pela produção da bobina e a produção da forma da bobina. Para os materiais e quantidades, são apresentados na Tabela 13.

Para o conjunto bobina, os processos envolvidos são distintos, onde a produção da bobina e forma da bobina são realizados em separado se anexando ao final. Após o corte do filme de poliamida, é feito o enrolamento do fio de cobre esmaltado AWG31 com adesivo em um gabarito. Levado à estufa por um tempo de 40 min à temperatura de 250 °C para a cura. Após resfriado é soldada a cordoalha cortando-a no tamanho adequado.

Tabela 13 – Informações de produção do conjunto bobina.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Forma da bobina	Fita adesiva poliamida	Poliamida	0	0,01
Forma da bobina	Filme poliimida	Poliimida	0	1,2
Bobina	Fio de cobre esmaltado AWG31	Cobre	0	3,2
Bobina	Cordoalha trançada N32	Cobre	0	0,88
Adesivo	Epoxi monocomponente	Epoxi	4,36	1,54
Adesivo	Solvente	Xileno	1,4	0,1

5.3.3 Chassi

Para o chassi, seu processo é realizado de forma direta sem uniões prévias a junção final. Para os materiais e quantidades são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Informações de produção do chassi.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Chassi	Carcaça bruta	Aço	485	615
Chassi	Tinta preta em pó	Epoxi poliéster	3	14
Chassi	Rebite	Ferro	0	1

Contemplado basicamente pela carcaça bruta, o chassi é recebido para a linha de produção estampada e pronto, seguindo para processos de pintura. O chassi é pendurado na linha de produção em ganchos para banho de limpeza seca (eliminar possíveis impurezas e limalhas). Em seguida aplicado tinta pó, seguido para secagem por 15 min à 200 °C de temperatura. O conjunto é separado e reservado.

5.3.4 Aranha

Equivalente ao chassi, o processo da aranha também é realizado de forma direta sem uniões prévias a junção final. Para os materiais e quantidades são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Informações de produção da aranha.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Aranha	Tecido <i>PolyCotton</i>	Poliéster e algodão	4,3	4,3
Aranha	Resina fenólica	Fenol-formaldeído	9,8	12,6
Aranha	Etanol	Etanol anidro	7	8
Aranha	Desmoldante	Silicone e aditivos	0	6

Sendo composto basicamente pelo tecido *PolyCotton* (mistura de fibras de poliéster com algodão), o tecido cru é impregnado com resina fenólica e cortado, após seco é estampado e cortado moldando o

seu formato final. O conjunto é separado e reservado para a etapa de união das componentes.

5.3.5 Cone

Para os materiais e quantidades do cone, são detalhados e apresentados na Tabela 16 com uma breve explicação dos seus processos de produção.

Tabela 16 – Informações de produção do cone.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Cone	Celulose	Celulose	0	14,7
Cone	Diluyente	Thinner	8	1
Cone	Tinta A	Laca Nitrocelulose	5	5
Cone	Tinta B	Laca Nitrocelulose	1	1
Cone	Água	Água	20	0

A componente é moldada à partir da celulose com água e aditivos, após seco é impregnado e pintado sendo cortado as partes internas e externas. Após estas etapas a suspensão acabada é anexada.

5.3.6 Suspensão

Similar a aranha, a suspensão é análoga aos seu processos, em relação aos materiais e quantidades, a Tabela 17 apresenta em detalhes.

Tabela 17 – Informações de produção da suspensão.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Suspensão	Tecido algodão	Algodão	0	8,1
Suspensão	Resina fenólica	Fenol-formaldeído	17,2	7,8
Suspensão	Etanol	Etanol anidro	36	1
Suspensão	Desmoldante	Silicone e aditivos	12	1
Suspensão	Corante	Corante	2	2,5
Adesivo	Vedante	Base borracha	0	5
Adesivo	Adesivo	Base borracha	0	2

A suspensão entra para a linha de produção com o tecido de algodão cru, onde é impregnado com resina fenólica e cortado. Após a secagem o moldado formando o produto acabado (onde é encaminhada para o setor de cones). Onde é reservado para as etapas finais de união.

5.3.7 Calota

No caso deste modelo de alto-falante, a calota possui o mesmo material do cone com a adição de outros materiais, como observado na Tabela 18.

Tabela 18 – Informações de produção da calota.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Calota	Celulose	Celulose	0	5,5
Calota	Corante	Azocorante	0	0,2
Calota	Emulsão catiônica	AKD	0	1
Calota	Dispersão aquosa	Negro de fumo	0	0,2
Calota	Tinta	Laca Nitrocelulose	0	0,45

Com a calota moldada a partir da celulose, é adicionado água e aditivos, quando seca é impregnada e pintada. Por fim é cortada e segue na linha para aguardar as etapas finais da produção do cone acabado, sendo a calota a última componente a se unir as demais.

5.3.8 Adesivos de junção

Os adesivos de junção foram modelados e analisados como uma componente simulada do sistema, visto que desta forma é possível realizar ajustes e análises separadamente, observando na Tabela 19, é composto por 3 adesivos diferentes.

Tabela 19 – Informações dos adesivos para junção das componentes.

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	SOBRA (g)	ACABADO (g)
Adesivo	Adesivo A	Cianoacrilato	0	4,73
Adesivo	Adesivo B	Base borracha	0	1,05
Adesivo	Adesivo C	Poliuretano reativo	0	2,5

Sendo possível na criação de cenários o rearranjo com outros adesivos visto alguma alteração realizada em outra componente (sendo necessário avaliar a capacidade de troca de adesivo). Estes adesivos são utilizados nas etapas de união das componentes, exemplificado e descritos na seção seguinte.

5.4 UNIÃO DAS COMPONENTES

Para a etapa da união das componentes, visto em detalhes no Capítulo 4 em "Materiais e métodos", o chassi é fixada no conjunto magnético. O conjunto bobina e a aranha são coladas no chassi, em seguida o cone e a suspensão juntas são encaixadas e coladas no conjunto bobina. Até esta etapa todas as componentes são fixadas no chassi, as etapas finais de montagem se fazem no encaixe dos terminais do alto-falante, fixação das cordoalhas nos terminais, colagem da calota e por fim testes de funcionamento do produto. A Figura 22 do Apêndice A, mapeia os processos que envolvem as componentes e conjuntos na linha de produção até a etapa de união das componentes descritos em detalhes na seção anterior.

5.5 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Como elucidado na Seção 4.6 "Escopo da ACV", os indicadores de categoria são usados para ponderar sobre o uso agregado de emissões ou recursos de cada categoria de impacto. A importância da etapa de avaliação dos impactos reside na simplificação dos resultados, uma vez que os mesmos se tornam mais compreensíveis. Mesmo motivo que a redução do número de parâmetros resultantes se torna necessário, considerando que o inventário pode conter mais de centenas de parâmetros. De forma sucinta e direta, a categoria de impacto é mais compreendida do que as emissões que causam o referido impacto, sendo mais fácil de compreender, pro exemplo, as consequências do que a emissão da substância causadora (ABNT, 2009a)

Para os resultados da avaliação, foram realizadas as fases de correlação dos dados por categoria de impacto (classificação), modelagem dos dados do inventário dentro das categorias (caracterização). A Tabela 24 do Apêndice A, apresenta os resultados finais para o alto-falante, sendo os resultados individuais de cada componente e o total. A segmentação dos resultados por componente se faz necessária para uma análise empírica, tornando possível detectar possíveis melhorias e também de forma rápida triar e remodelar determinada componente do sistema.

5.6 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A etapa de interpretação do ciclo de vida é a fase da ACV na qual as validações são realizadas a partir da combinação do inventário e da avaliação de impacto do ciclo de vida, visando alcançar conclusões e recomendações. A fase de interpretação também pode envolver o processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV (ABNT, 2009a). Sendo assim, na Tabela 24 do Apêndice A podemos verificar de forma analítica valores relativamente altos para o conjunto magnético em quase todas categorias (exceto Smog), se comparado com as demais componentes. A Figura 15 normaliza os valores totais em termos percentuais para facilitar a análise.

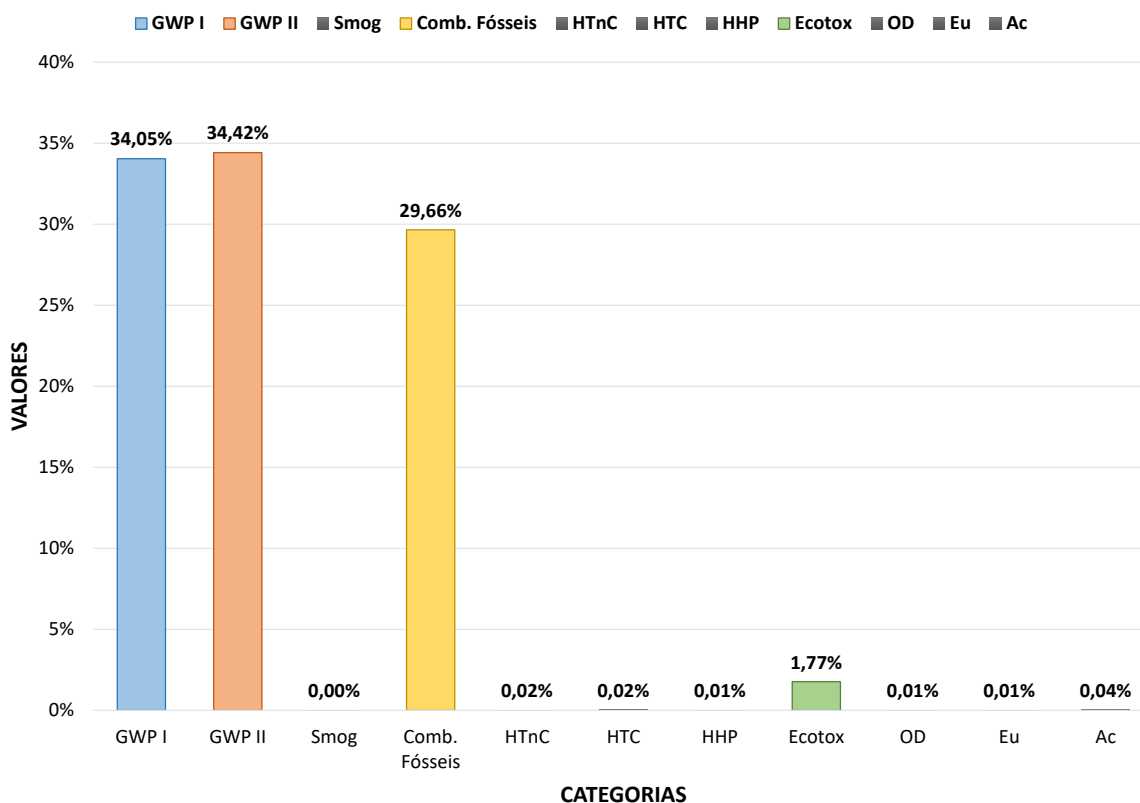


Figura 15 – Resultados AICV normalizado em termos percentuais.

No eixo das abcissas temos dispostas as categorias, no eixo das ordenadas os valores totais (todas as componentes) normalizados. Quando realizado a normalização dos valores, torna-se possível identificar de forma simples e direta os resultados que mais se destacam. Na Figura 15 podemos observar que as categorias que mais se destacam, em ordem decrescente: GWP II com 34,42 %; GWP I com 34,05 %; Comb. Fósseis com 29,66 %; Ecotox com 1,77 %. Em relação aos valores de GWP I e II próximos, são esperados pois diferem apenas na inclusão do carbono biogênico no balanço (emissões relacionadas ao ciclo natural do carbono).

Na Figura 16 podemos observar que as categorias que mais se destacaram na Figura 15 se alteraram, na ordem crescente: Comb. Fósseis com 41,72 %; GWP I com 24,46 %; GWP II com 24,39 %; Ecotox com 8,16 %. Desta forma, comprova que o conjunto magnético é o principal influenciador e será analisado separadamente.

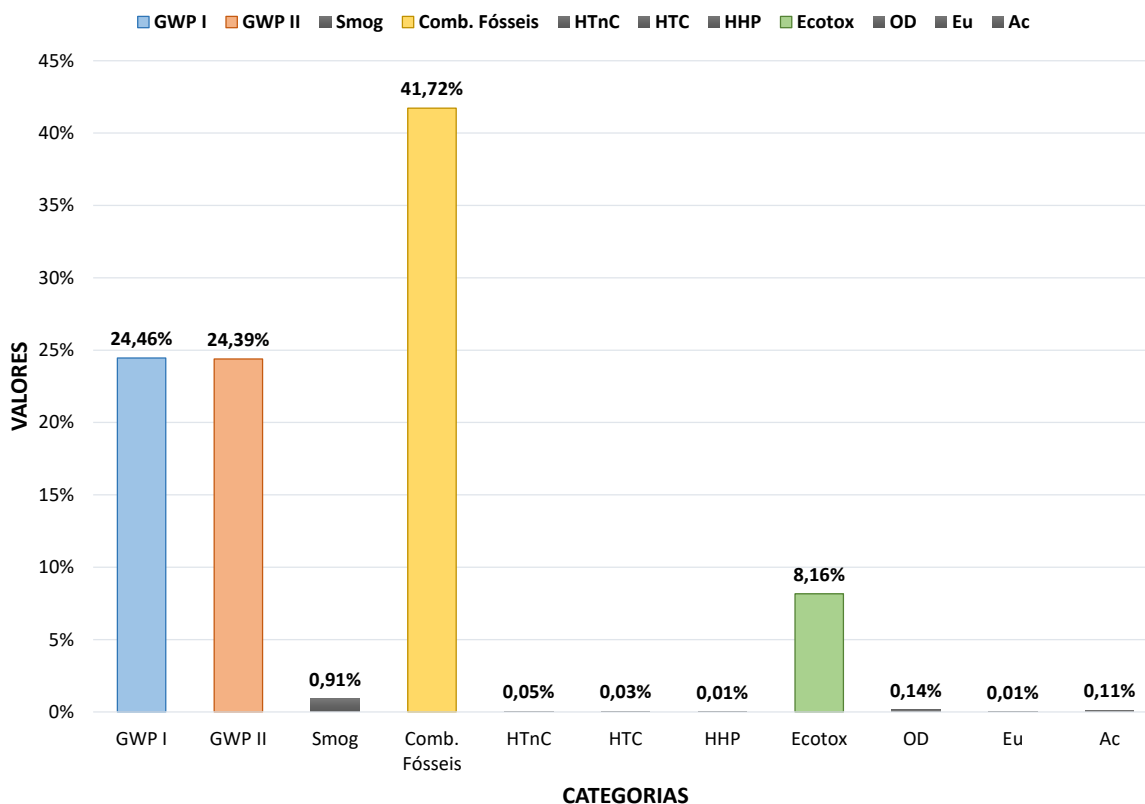


Figura 16 – Resultados AICV normalizado em termos percentuais, exceto conjunto magnético.

A Figura 17 e Figura 18, ilustram os resultados com valores do conjunto magnético suprimido, sendo a Figura 17 com a inversão dos eixos para melhor visualização. Com a inversão dos eixos e a normalização, podemos visualizar valores menos acentuados para o chassi, estes resultados associados a sua contribuição em massa para o alto-falante, validam a hipótese da relação material vs massa do produto, visto que o chassi representa 16,09 % da massa total do alto-falante, mas, teve melhores resultados no ponto de vista ambiental.

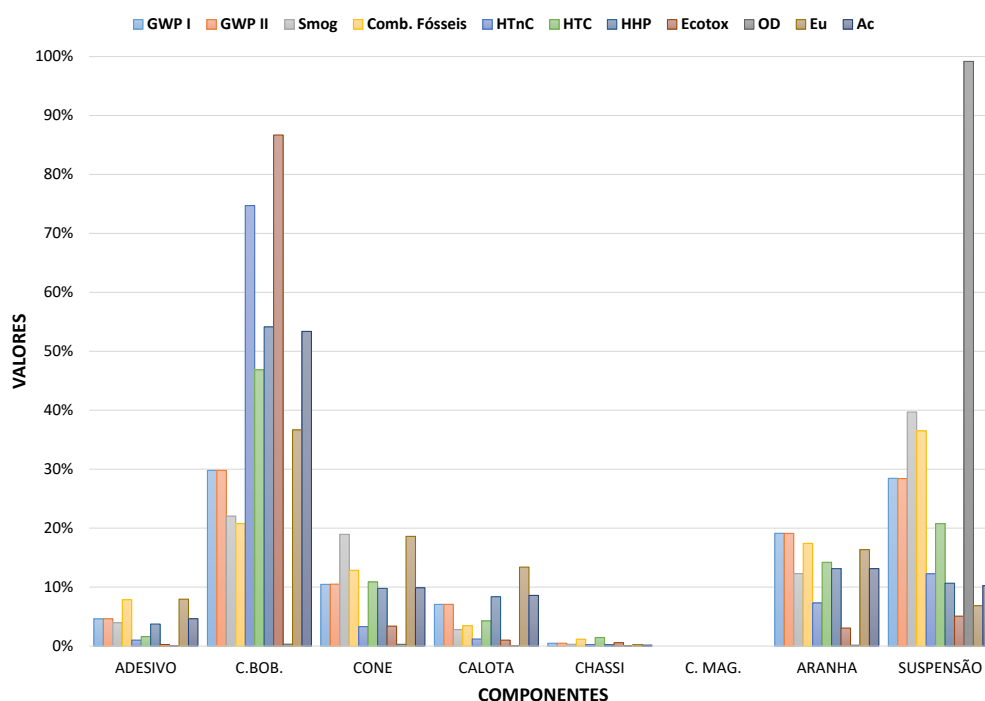


Figura 17 – Resultados AICV com o conjunto magnético suprimido em relação às componentes.

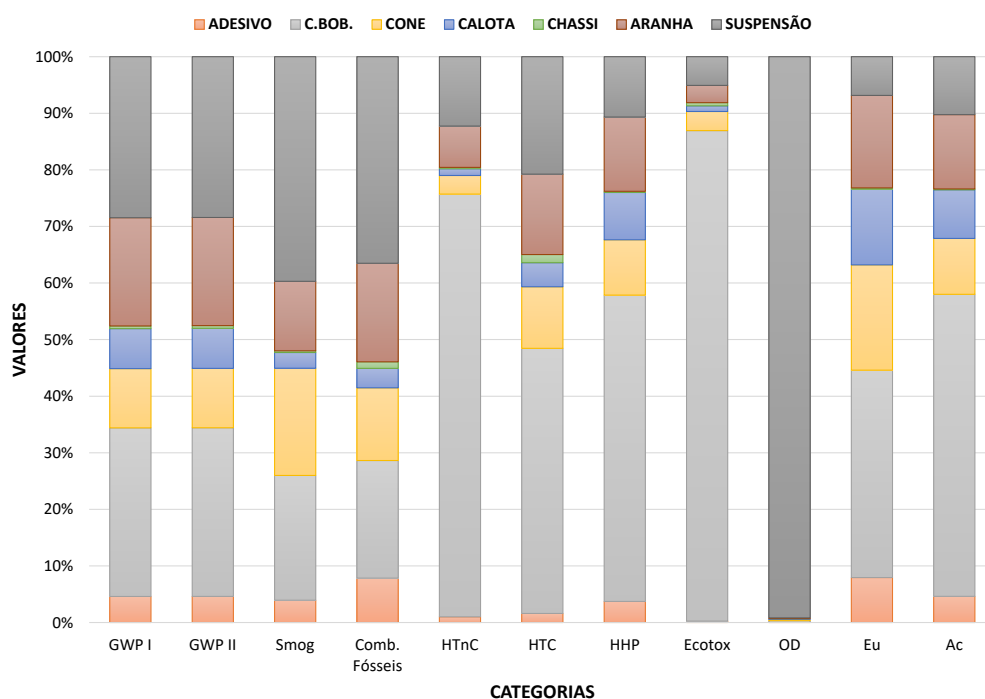


Figura 18 – Resultados AICV com o conjunto magnético suprimido em relação às categorias.

Outra componente que apresentou valores significativos foi a do conjunto bobina, sendo números que refletem não a sua quantidade, mas, as consequências da sua extração e processos que envolvem sua manufatura até a componente acabada. Como exemplo do cobre na fase de extração, no beneficiamento do minério que é composto por uma série de processos, como sua extração, processos de separação, lavagem (grandes quantidades de água), moagem, ustulação (aquecimento do sulfeto para obtenção do matte), conversão do matte em blister (oxidação do matte em altas temperaturas), refino e eletrólise e a

disposição dos rejeitos provenientes da calcopirita até seu fluxo de saída (SILVA, 2019). Desta forma, impactando diretamente nas categorias em análise sendo objeto de estudo e melhoria.

5.7 CENÁRIOS E PROPOSTA DE OPÇÕES PARA ECODESIGN

5.7.1 Sobras

O cálculo da sobra se faz necessário para o balanço de entradas e saídas do inventário, sendo calculado para cada componente. Sendo este, sobras de materiais, emissões, descarte proveniente de processos intermediários na fabricação de componentes até mesmo evaporação de substâncias. O resultante da sobra para a produção do alto-falante, total de entrada e saída foram quantificado na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de entrada e saída das componentes.

COMPONENTE	SAÍDA (g)	ENTRADA (g)	SOBRA (g)
Conjunto magnético	3.159,26	3.707,26	548,00
Chassi	630	1118	488,00
Conjunto bobina	10,69	16,45	5,76
Aranha	30,9	52	21,10
Cone	21,7	55,7	34,00
Suspensão	27,4	94,6	67,20
Calota	7,35	7,35	0,00
Adesivo	8,28	8,28	0,00
TOTAL	3.895,58	5.059,64	1.164,06

Para o cálculo da AICV foram reformuladas todas as entradas e saídas da modelagem considerando apenas a quantidade da sobra, onde os resultados foram descritos na Tabela 21.

Tabela 21 – AICV - TRACI 2.1 da sobra das componentes.

CATEGORIA	UNIDADE	SOBRA
GWP I	kg CO ₂ eq.	1,05E+03
GWP II	kg CO ₂ eq.	1,07E+03
Smog	kg O ₃ eq.	2,51E+01
Comb. Fósseis	MJ	9,18E+02
HTnC	CTUh	5,56E-01
HTC	CTUh	6,68E-01
HHP	kg PM2.5 eq.	2,14E-01
Ecotox	CTUe	5,50E+01
OD	kg CFC 11 eq.	3,06E-01
Eu	kg N eq.	2,00E-01
Ac	kg SO ₂ eq.	1,29E+00

Desta forma, foi possível calcular a contribuição da sobra para a produção do alto-falante, sendo em média aproximadamente 18,85 % para todas as categorias de impacto observado na Figura 19. Esta abordagem é relevante pois apresenta um cenário possível de melhoria, seja pelo estudo na reutilização de parte desta sobra ou até mesmo o Ecodesign das componentes de maior parcela na sobra, abordagem que será tratada no cenário a seguir.

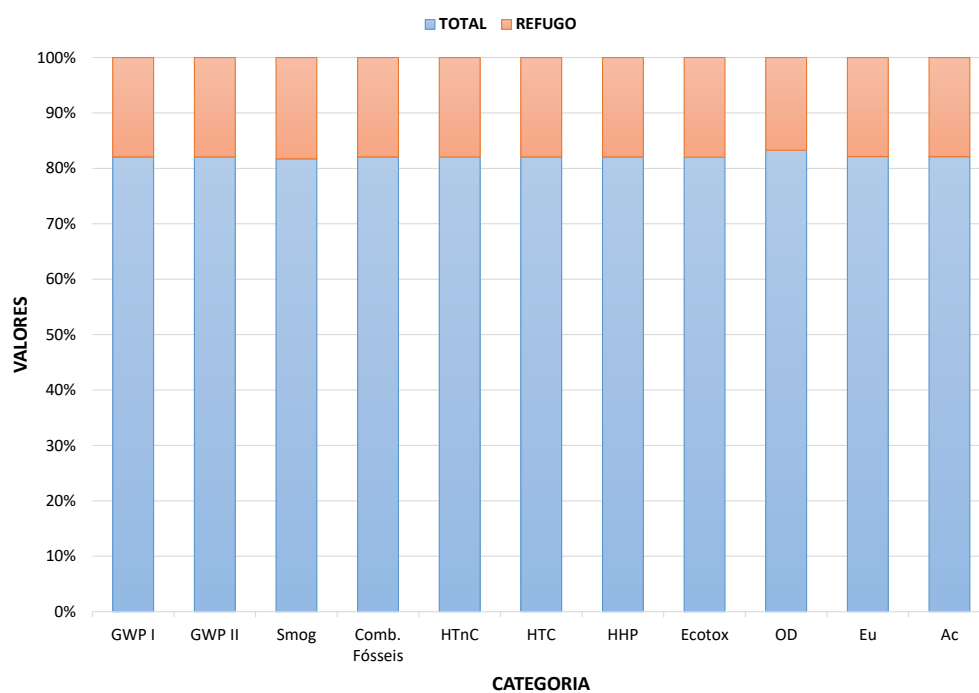


Figura 19 – Normalização dos resultados da sobra em percentil.

5.7.2 Biomateriais

Como abordagem de Ecodesign para componentes do alto-falante, os polímeros são indicados visto a vasta série de possibilidades e inovações que ainda estão em crescimento (PIRES; MORAES., 2015). Dado a escolha ligada diretamente as suas propriedades, sendo suas principais a serem analisadas como critério de corte: resistência temperatura; resistência mecânica; rigidez; estabilidade química; extingüível a chama. Abaixo é ilustrado o exemplo de uma pirâmide polimérica, onde a base é composta por polímeros mais comuns até o topo com tecnologias de maior valor agregado.

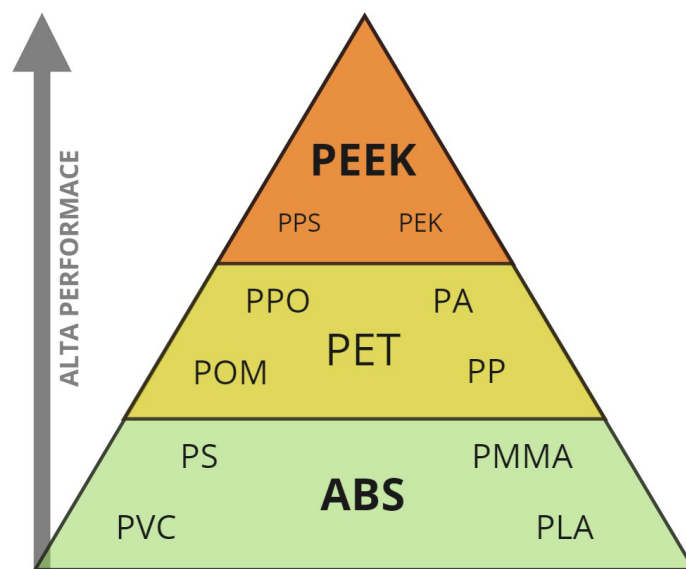


Figura 20 – Exemplo da pirâmide polimérica.

Os custos e disponibilidade são proporcionais a performance do material, como exemplo, materiais de categoria intermediária são também foco de análise de viabilidade pois são passíveis de realizar a incorporação de fibra de vidro, contornando certas desvantagens físico-mecânicas. A lista abaixo foi estabelecida após um breve levantamento de possibilidades para Ecodesign de componentes do alto-falante, como exemplo a chapa polar anexa ao chassi, definidos nos capítulos anteriores como a componente que mais contribui para as categorias de impacto ambiental.

- Polieterecetona (PEEK)
- Polietercetona (PEK)
- Polioximetileno Acetal (POM)
- Policloreto de vinila (PVC)
- Polipropileno (PP)
- Politereftalato de etileno (PET)
- Poli (metacrilato de metila) (PMMA)

- Polifenilsulfona (PPSU)
- Poliamida-imida (PAI)
- Polietirimida (PEI)
- Poliamida (PA)
- Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

5.7.3 Biomateriais - Cenários

Como efeito da substituição do chassi, se faz essencial a análise para melhorias no conjunto magnético como um todo, sendo tecnologicamente viável e possível a comutação do ímã de ferrite por neodímio (equivalente ao ferrite com menor massa). Em termos AICV o neodímio apresenta em torno de 30 % menos contribuições para categorias de impacto, observado em (FAN et al., 2021).

Tabela 22 – AICV - Comparativo dos materiais para conjunto magnético.

CATEGORIA	UNIDADE	ABS	PEEK	FERRO
GWP I	kg CO ₂ eq.	6,08E+03	3,04E+04	4,82E+03
GWP II	kg CO ₂ eq.	6,10E+03	3,03E+04	4,88E+03
Smog	kg O ₃ eq.	2,25E+02	1,01E+03	3,90E-03
Comb. Fósseis	MJ	2,28E+04	8,71E+04	4,20E+03
HTnC	CTUh	8,13E-04	2,38E-03	2,54E+00
HTC	CTUh	1,25E-05	2,65E-05	3,05E+00
HHP	kg PM2.5 eq.	4,50E-01	5,65E+00	9,78E-01
Ecotox	CTUe	9,87E+02	2,20E+03	2,50E+02
OD	kg CFC 11 eq.	7,26E-06	2,53E-09	1,52E+00
Eu	kg N eq.	1,19E+00	4,27E+00	9,20E-01
Ac	kg SO ₂ eq.	1,13E+01	8,77E+01	5,93E+00

Foi realizado a modelagem do conjunto magnético do alto-falante em estudo para os extremos de performance dos polímeros, são eles os materiais: ABS e PEEK. A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos da AICV, não balanceada para a escala de peso/função do material, sendo utilizado o mesmo peso para todos.

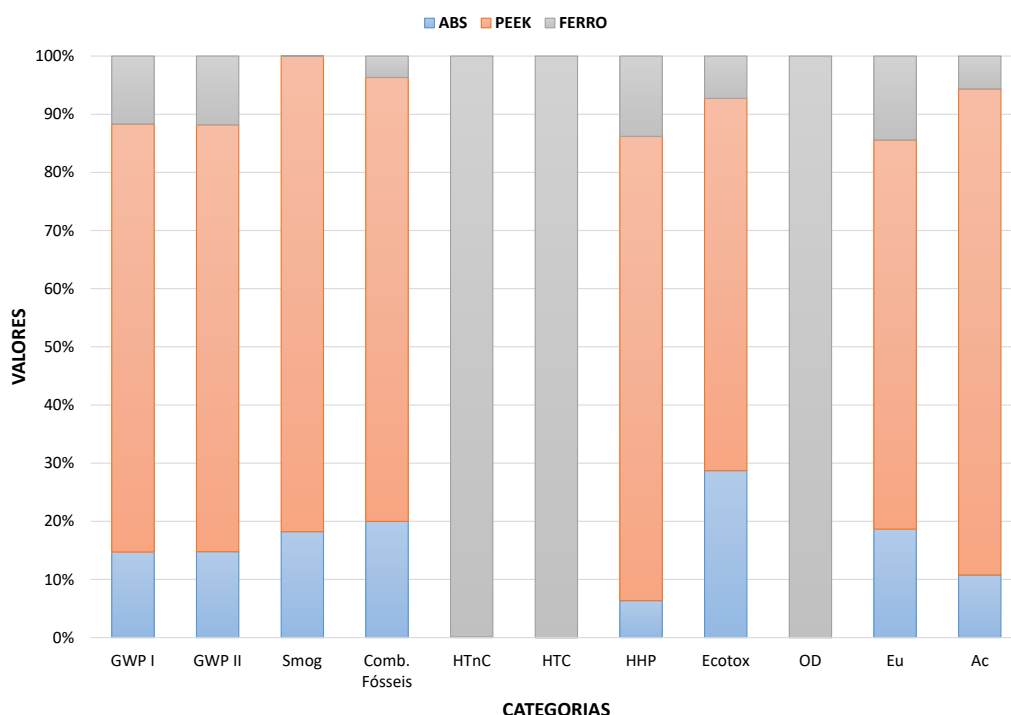


Figura 21 – Comparativo do conjunto magnético com biomateriais.

Pela Figura 21, pode-se observar que o ABS apresenta valores muito menores que o PEEK e em aproximadamente 20 % no geral acima do ferro (utilizado originalmente na chapa polar), sendo o ferro com valores de HTnC, HTC e OD em mais de duas escalas acima de todos. Ressaltando que o seu peso não foi caracterizado, em outras palavras, com a realização de uma modelagem acústica será possível determinar exatamente a quantidade necessária de polímero para essa componente. Sendo assim, um cenário com melhorias ambientais significativas na utilização do ABS. Essa melhoria no desempenho ambiental no cenário projetado pode ser um grande avanço para indústria de alto-falantes à favor da Economia Circular, considerando a totalidade de produtos em produção.

5.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações de âmbito tecnológico acústico podem ser realizadas a partir de resultados da ACV, sendo também para corroborar os cenários propostos, criando novos ajuste estruturais em termos de quantidade e qualidade do material. O desempenho tecnológico do produto e os seus impactos decorrentes pela proposição das melhorias no desempenho ambiental, podem ser realizados e validados com os softwares Ansys Acoustics Simulation em conjunto com FINE Software (Acoustic Finite Element) para de modelagem mecânica estrutural e acústica, sendo aplicado a métodos numéricos, como FEM (método dos elementos finitos) e BEM (método dos elementos de contorno). Outros recursos que podem ser encontrados nos softwares são: definição de elementos acústicos; constantes e propriedades materiais; acoplamento de domínios acústicos FEM e BEM; interação estrutura-acústica; aplicação de condições de contorno acústica; pós-processamento de SPL; comportamento elétrico de ímãs, bobinas e materiais de ferro macio em transdutores. Para projeções futuras deste estudo, um novo escopo será definido visando a análise acústica das componentes projetadas nos cenários.

6 CONCLUSÕES

Com o aprofundamento e o entendimento técnico e ambiental combinados, foi possível identificar melhorias tanto no âmbito conceitual da produção de alto-falantes, quanto na contribuição para o meio ambiente. Em termos percentuais, uma margem de 18,85 % dos impactos ambientais encontrados no cenário da sobra, é susceptível de melhoria. Como cenário de Ecodesign para a componente de maior impacto ambiental, a substituição de materiais do conjunto magnético expôs vantagens ambientais.

Neste contexto, o fomento para expandir a escolha dos materiais que compõe um alto-falante, os conceitos, os procedimentos, se fazem fundamentais e de forma direta com o auxílio de empresas especializadas no ramo, aumentando o grau de assertividade e integridade na segurança dos dados obtidos e gerados. Sendo assim, criando a possibilidade da expansão da metodologia abordada, capacitando e preenchendo a lacuna teórica encontrada durante a RBS e pouca vinculada ao setor de alto-falantes.

Auferido também, objetivos para novos meios na utilização de materiais menos hostis ao meio ambiente, em consequência, a geração de novos cenários e possibilidades para serem aplicados à engenharia do produto, contribuindo diretamente para o meio ambiente e para uma produção mais eficiente.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura**. [S.l.], 2009.
- ABNT. **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações**. [S.l.], 2009.
- ACEA. **World motor vehicle production**. 2021. <https://www.acea.auto/figure/world-motor-vehicle-production/>. Acesso: 16/08/2022.
- ADIBI, N.; LAFHAJ, Z.; PAYET, J. New resource assessment characterization factors for rare earth elements: applied in ndfeb permanent magnet case study. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 712–724, 2019.
- BONNETERRE, J.; KATSAOUNIS, D.; KHONG, Y. **Sennheiser AMBEO Soundbar, RTING Lab**. 2019. <https://www.rtings.com/soundbar/reviews/sennheiser/ambeo-soundbar>. Acesso: 11/03/2022.
- BORWICK, J. **Loudspeaker and Headphone Handbook**. 2001. Taylor & Francis.
- BRESSANELLI, G. et al. Circular economy in the weee industry: a systematic literature review and a research agenda. **Sustainable Production and Consumption**, v. 23, p. 174–188, 2020.
- COEY, J. Rare-earth magnets. **Endeavour**, v. 19, n. 4, p. 146–151, 1995.
- COEY, J. Permanent magnet applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 248, n. 3, p. 441–456, 2002.
- COLLOMS, M. **High performance loudspeakers : optimising high fidelity loudspeaker systems**. Seventh edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018. 663 p. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118706275>>.
- CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: Aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. 2011.
- DICKASON, V. **The Loudspeaker Design Cookbook**. Audio Amateur Press, 2007. ISBN 9781882580477. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=_K3SAAAACAAJ>.
- EARGLE, J. **The Loudspeaker Handbook**. 2003. Kluwer Academic Press.
- EPA. **Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)**. 2020. <https://www.epa.gov/rcra/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-overview>. Acesso: 10/01/2021.
- FAN, Y. et al. Life cycle assessment of the ndfeb recycling process route for oil sludge waste treatment. **Materials Science Forum**, v. 1035, p. 1050–1061, 06 2021.
- GUINÉE, J.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R. **Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards**. 2002. Dordrecht.
- JIN, H. et al. Comparative life cycle assessment of ndfeb magnets: Virgin production versus magnet-to-magnet recycling. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 45–50, 2016.
- KURATOMO, N. et al. Effects of acoustic comfort and advertisement recallability on digital signage with on-demand pinpoint audio system. **Applied Acoustics**, v. 184, 2021.

- LAUTIER, A. et al. Development of normalization factors for canada and the united states and comparison with european factors. **Science of The Total Environment**, v. 409, p. 33–42, 2010.
- LOCTITE. **Sound Engeering from Loctite: Speaker Assembly Adhesive Guide**. Loctite North & Central America: [s.n.], 2000.
- MHATRE, P.; PANCHAL, R.; SINGH A. BIBYAN, S. A systematic literature review on the circular economy initiatives in the european union. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 187–202, 2021.
- MICAH, B. **Neodymium and the global headphone market**. Japan, 2015.
- NATIONS, U. **Report to the World Commission on Environment and Development (Report A/42/427)**. 1987.
- OLIVEIRA, J. A. et al. Life cycle engineering and management of products: Theory and practice. **Springer, Cham.**, v. 1, p. 408, 2021.
- PACETE, L. G. **Alexa e Google Assistente impulsionam novos negócios baseados em voz**. 2022. <https://forbes.com.br/forbes-tech/2022/02/alexa-e-google-assistente-impulsionam-novos-negocios-baseados-em-voz/>. Acesso: 15/04/2022.
- PETROCK, V. **Voice Assistant and Smart Speaker Users**. 2020. <https://www.emarketer.com/content/voice-assistant-and-smart-speaker-users-2020>. Acesso: 12/04/2022.
- PIRES, A. C. K. B. A. L. R.; MORAES. Ângela M. **BIOMATERIAIS: TIPOS, APLICAÇÕES E MERCADO**. 2015.
- POLLINI, B.; ROGNOLI, V. Early-stage material selection based on life cycle approach: tools, obstacles and opportunities for design. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 1130–1139, 2021.
- POLVERINI, D. Regulating the circular economy within the ecodesign directive: Progress so far, methodological challenges and outlook. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 1113–1123, 2021.
- PéREZ-MARTÍNEZ, M. M. et al. Life cycle assessment of repurposed waste electric and electronic equipment in comparison with original equipment. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 1637–1649, 2021.
- REMY, M. **Innovative Ironless Loudspeaker Motor Adapted to Automotive Audio**. Acoustics [physics.class-ph]. Université du Maine: [s.n.], 2011.
- RYBERG, M. et al. Development of normalization factors for canada and the united states and comparison with european factors. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, p. 329–339, 2014.
- SCHILLER, N. H.; N.S., Z. **Initial developments toward an active noise control system for small unmanned aerial systems**. 2018.
- SILVA, L. A. e. a. **COPPER: INDUSTRIAL PRODUCTION AND APPLICATIONS**. 2019.
- WENZEL, H.; HAUSCHILD, M. Z.; ALTING, A. **Environmental Assessment of Products. Methodology, Tools and Case Studies in Product Development**. 1997. Dordrecht.

- WINER, E. **The Audio Expert: Everything You Need to Know About Audio**. Routledge, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.4324/9781315223162>>.
- YANG, Y.; WALTON, A.; SHERIDAN, R. Re recovery from end-of-life ndfeb permanent magnet scrap: A critical review. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 122–149, 2017.
- ZENKER, B.; MERCHEL, S.; ALTINSOY, M. E. **Rethinking flat panel loudspeakers – An objective acoustic comparison of different speaker categories**. 2019.

APÊNDICE A – FLUXOS E RESULTADOS

Tabela 23 – Resultados da síntese qualitativa.

AUTOR	FONTE	IDIOMA	DOCUMENTO	CLASSIFICAÇÃO	ABORDAGEM	SETOR
ABNT - ISO 14040 (2009)	ABNT.org	Português	Manual técnico	Teórico	Qualitativa	ACV
ALMEIDA, A. (2019)	Athena	Português	Artigo	Empírico	Quantitativa	ACV/Alto-falante
BARE, J. C. (2003)	ResearchGate	Inglês	Artigo	Teórico	Qualitativa	ACV
BORWICK, J. (2001)	Taylor&Francis	Inglês	Livro	Teórico	Qualitativa	Alto-falante
CONFORTO, E. C. (2011)	Scirp.org	Português	Artigo	Teórico	Qualitativa	Outros
COLLOMS, M. (2018)	Google Books	Inglês	Livro	Teórico	Qualitativa	Alto-falante
EARGLE, J. (2003)	Springer	Inglês	Livro	Teórico	Qualitativa	Alto-falante
GUINÉE, J. (2002)	Springer	Inglês	Livro	Teórico	Qualitativa	ACV
LAUTIER, A. (2010)	ResearchGate	Inglês	Artigo	Empírico	Qualitativa	ACV
OLIVEIRA, J. A. (2021)	Springer	Inglês	Livro	Teórico	Qualitativa	ACV
PÉREZ, M. (2021)	ScienceDirect	Inglês	Artigo	Empírico	Quantitativa	ACV

Tabela 24 – Resultados da AICV para o modelo (TRACI 2.1).

CATEGORIA	UNIDADE	ADESIVO	C. BOB.	CONE	CALOTA	CHASSI	C. MAG.	ARANHA	SUSPENSÃO	TOTAL
GWPI	kg CO ₂ eq.	5,11E-02	3,30E-01	1,16E-01	7,84E-02	5,27E-03	4,82E+03	2,12E-01	3,15E-01	4,83E+03
GWPII	kg CO ₂ eq.	5,11E-02	3,30E-01	1,16E-01	7,83E-02	5,28E-03	4,88E+03	2,11E-01	3,14E-01	4,88E+03
Smog	kg O ₃ eq.	1,64E-03	9,14E-03	7,85E-03	1,15E-03	1,25E-04	3,90E-03	5,09E-03	1,64E-02	1,15E+02
Comb. Fósseis	MJ	1,49E-01	3,93E-01	2,43E-01	6,50E-02	2,20E-02	4,20E+03	3,29E-01	6,90E-01	4,20E+03
HTnC	CTUh	2,17E-05	1,61E-03	7,07E-05	2,57E-05	5,18E-06	2,54E+00	1,57E-04	2,64E-04	2,54E+00
HTC	CTUh	2,08E-05	6,07E-04	1,41E-04	5,51E-05	1,87E-05	3,05E+00	1,84E-04	2,69E-04	3,06E+00
HHP	kg PM2.5 eq.	1,25E-05	1,81E-04	3,28E-05	2,80E-05	7,09E-07	9,78E-01	4,40E-05	3,57E-05	9,78E-01
Ecotox	CTUe	9,47E-04	3,21E-01	1,25E-02	3,71E-03	2,07E-03	2,50E+02	1,13E-02	1,88E-02	2,51E+02
OD	kg CFC 11 eq.	4,85E-07	2,07E-05	1,88E-05	3,87E-06	2,30E-07	1,52E+00	9,26E-06	6,39E-03	1,53E+00
Eu	kg N eq.	4,47E-05	2,06E-04	1,05E-04	7,52E-05	1,20E-06	9,20E-01	9,18E-05	3,84E-05	9,21E-01
Ac	kg SO ₂ eq.	2,40E-04	2,77E-03	5,13E-04	4,46E-04	8,01E-06	5,93E+00	6,82E-04	5,31E-04	5,93E+00

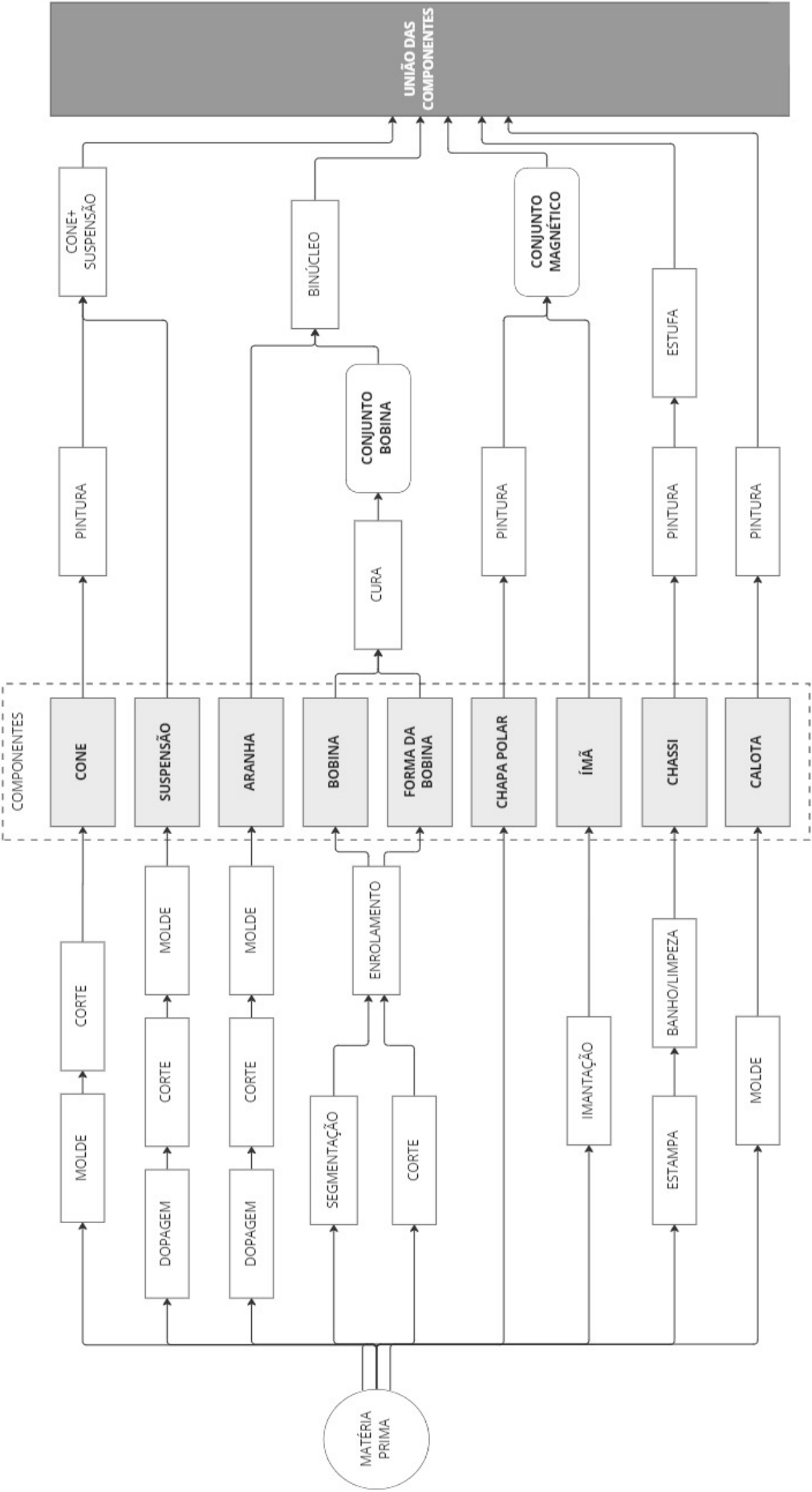


Figura 22 – Fluxos para união das componentes.