

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE FRANCA
“Dr. THOMAZ NOVELINO”**

TECNOLOGIA EM GESTÃO DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL

**CLAYTON RODRIGUES DO CARMO
HENRIQUE ROCHA INÁCIO**

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR WANKEL ELÉTRICO:
Inovação, eficiência energética e sustentabilidade na indústria

**FRANCA/SP
2025**

CLAYTON RODRIGUES DO CARMO
HENRIQUE ROCHA INÁCIO

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR WANKEL ELÉTRICO:
Inovação, eficiência energética e sustentabilidade na indústria

Projeto de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de Franca - “Dr. Thomaz Novelino”, como parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial.

Orientador: Prof. Me. Fernando dos Santos
Soeira

FRANCA/SP

2025

CLAYTON RODRIGUES DO CARMO
HENRIQUE ROCHA INÁCIO

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR WANKEL ELÉTRICO:
Inovação, eficiência energética e sustentabilidade na indústria

Projeto de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de Franca – “Dr. Thomaz Novelino”, como parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial.

Projeto avaliado e aprovado pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador: _____
Nome: Prof. Esp. Fernando dos Santos Soeira
Instituição: Faculdade de Tecnologia de Franca – “Dr. Thomaz Novelino”

Examinador 1: _____
Nome: Prof. Dr. Diógenes Bosquetti
Instituição: Faculdade de Tecnologia de Franca – “Dr. Thomaz Novelino”

Examinador 2: _____
Nome: Prof. Me. Johnny Luis Mercuri
Instituição: Faculdade de Tecnologia de Franca – “Dr. Thomaz Novelino”

Franca, 24 de outubro de 2025

RESUMO

O cenário global, marcado pela transição energética e pela urgência em adotar soluções de propulsão mais eficientes e limpas, impulsionou a busca por inovações em arquiteturas de motores. Neste contexto, o presente projeto de graduação teve como objetivo central desenvolver um protótipo de motor elétrico de Corrente Contínua (CC) com uma arquitetura rotativa inédita, inspirada no princípio de funcionamento do motor Wankel, visando superar as limitações de desempenho dos motores elétricos convencionais e aliar eficiência, densidade de potência e sustentabilidade na indústria. O estudo utilizou uma metodologia sistematizada e controlada, organizada em quatro grandes etapas: planejamento do projeto, aquisição de matéria-prima, montagem do modelo e busca por financiamento, o que assegurou a integridade técnica e a otimização dos recursos ao longo do desenvolvimento. O projeto culminou na prototipagem de um motor que incorpora dois rotores interligados, equipados com um total de 120 ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB), e um estator com 14 bobinas de cobre de alta pureza, resultando em um design compacto, leve e com avançado sistema de refrigeração passiva/ativa. Os resultados obtidos com as especificações técnicas demonstram um motor com desempenho estimado até três vezes superior ao de motores CC tradicionais em condições operacionais equivalentes, apresentando alta densidade de torque e curva de saída estável. A principal discussão reside na elevada versatilidade desta solução, tornando-a particularmente promissora para a propulsão de veículos elétricos, robôs industriais e aeronaves não tripuladas (VANTs), onde o baixo peso específico e a alta relação potência-peso são diferenciais competitivos. Em suma, a bem-sucedida adaptação do conceito Wankel ao contexto eletromagnético representa um avanço significativo na engenharia de motores elétricos, fornecendo uma alternativa inovadora e viável que está alinhada às demandas de tecnologias de propulsão mais sustentáveis e eficientes para o futuro da indústria.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Inovação Industrial. Motor Elétrico. Sustentabilidade. Wankel.

ABSTRACT

The global scenario, marked by the energy transition and the urgency to adopt more efficient and cleaner propulsion solutions, has driven the search for innovations in motor architecture. In this context, this undergraduate project's central objective was to develop a prototype Direct Current (DC) electric motor with a novel rotary architecture, inspired by the operating principle of the Wankel engine, aiming to overcome the performance limitations of conventional electric motors and combine efficiency, power density, and sustainability in the industry. The study used a systematic and controlled methodology, organized into four major stages: project planning, raw material acquisition, model assembly, and funding acquisition, which ensured technical integrity and resource optimization throughout the development process. The project culminated in the prototyping of a motor incorporating two interconnected rotors equipped with a total of 120 neodymium-iron-boron (NdFeB) permanent magnets and a stator with 14 high-purity copper coils, resulting in a compact, lightweight design with an advanced passive/active cooling system. The results obtained with the technical specifications demonstrate a motor with estimated performance up to three times higher than that of traditional DC motors under equivalent operating conditions, featuring high torque density and a stable output curve. The main discussion lies in the high versatility of this solution, making it particularly promising for the propulsion of electric vehicles, industrial robots, and unmanned aircraft (UAVs), where low specific weight and a high power-to-weight ratio are competitive advantages. In short, the successful adaptation of the Wankel concept to the electromagnetic context represents a significant advance in electric motor engineering, providing an innovative and viable alternative that aligns with the demands for more sustainable and efficient propulsion technologies for the future of industry.

Keywords: Electric Motor. Energy Efficiency. Industrial Innovation. Sustainability. Wankel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ciclos do motor Wankel.....	16
Figura 2- Bateria automotiva.....	19
Figura 3- Componentes do motor Wankel.	20
Figura 4- Etapas do processo de concepção e desenvolvimento.	25
Figura 5- Representação técnica com as dimensões principais do motor elétrico Wankel.....	25
Figura 6- Vista explodida do motor elétrico Wankel.....	27
Figura 7- Relação detalhada dos elementos constituintes do motor elétrico Wankel.	28
Figura 8- Modelo final com tampa frontal translúcida para análise interna.	29
Figura 9- Modelo computacional completo do motor elétrico Wankel.....	30

LISTA DE TABELA

Tabela 1- Detalhamento de custos.....	37
--	----

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
1 REVISÃO DA LITERATURA.....	11
1.1 INDÚSTRIA, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE	11
1.2 MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA	12
2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS E CONCEITUAIS DO MOTOR WANKEL ELÉTRICO.....	14
2.1 HISTÓRICO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES WANKEL.....	14
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES WANKEL	15
2.3 VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DOS MOTORES WANKEL ELÉTRICOS	17
2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE DO MODELO DESENVOLVIDO	19
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE MOTOR WANKEL ELÉTRICO	22
3.1 PLANEJAMENTO INICIAL E DEFINIÇÃO DO ESCOPO	22
3.2 PROTOTIPAGEM	24
3.3 ESTRUTURA TÉCNICA DO PRODUTO: COMPONENTES, MATERIAIS E FUNCIONALIDADE	31
3.4 RESULTADOS OBTIDOS E AVALIAÇÃO TÉCNICA DO PROTÓTIPO.....	33
4 VIABILIDADE ECONÔMICA E PROPOSTAS DE MELHORIA.....	36
4.1 GERENCIAMENTO DE CUSTOS	36
4.2 ESTIMATIVAS DE CUSTO E ANÁLISE ORÇAMENTÁRIA	36
4.3 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	38
4.4 PROPOSTA DE MELHORIA	39
CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	43

INTRODUÇÃO

A transição energética global, impulsionada pela urgência climática e pela busca por maior eficiência, estabelece a eletrificação como a rota principal para a mobilidade e a indústria. Neste cenário, o presente trabalho foca no desenvolvimento de um Motor *Wankel* Elétrico, propondo uma tecnologia motriz inovadora que visa alto desempenho e sustentabilidade (Wolffenbuttel, 2021).

Historicamente, o Motor *Wankel* a combustão destacou-se por seu design engenhoso, apresentando características estruturais altamente desejáveis, como compactidade, baixo peso, operação suave e elevada densidade de potência. Seu princípio rotativo elimina o movimento alternado, otimizando a relação potência-volume. Contudo, limitações termodinâmicas, como problemas de vedação e a queima incompleta inerentes à sua câmara, resultaram em menor eficiência térmica e emissões insustentáveis, restringindo sua adoção em larga escala (Toledo, 2009).

O ponto de vista central desta pesquisa é que as desvantagens do *Wankel* são superáveis através da transposição de seu princípio rotativo para o domínio eletromagnético. Ao desenvolver um Motor Elétrico de Corrente Contínua (CC) baseado na arquitetura *Wankel*, é possível herdar suas vantagens estruturais — peso e volume reduzidos — enquanto se eliminam os desafios da combustão. O projeto propõe o uso de rotores com ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) interagindo com 14 bobinas de cobre, visando um desempenho em torque e potência até três vezes superior ao de motores CC convencionais de volume comparável.

A justificativa para este estudo reside na necessidade de preencher uma lacuna de mercado por soluções motrizes que ofereçam alta densidade de potência com eficiência sustentável. O desenvolvimento desta tecnologia no Brasil é estratégico para a competitividade da indústria nacional, com aplicações promissoras em veículos elétricos, robótica industrial e VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), setores onde a relação potência-peso é crítica.

Os objetivos específicos que guiaram a execução deste trabalho foram analisar o contexto da transição energética e as necessidades por soluções de propulsão eficientes e sustentáveis, estudar os fundamentos do motor *Wankel* a combustão e identificar suas características estruturais otimizáveis em uma versão elétrica, projetar as especificações técnicas de um Motor Elétrico de Corrente Contínua com arquitetura

Wankel, definindo geometria, materiais magnéticos e configuração das bobinas, desenvolver a documentação técnica (desenhos CAD, dimensões e lista de componentes) para a prototipagem e propor as aplicações industriais e tecnológicas do motor, considerando sua alta densidade de torque e eficiência projetada.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver e caracterizar um protótipo de motor elétrico de Corrente Contínua (CC) com arquitetura rotativa inspirada no princípio *Wankel*, focado em alta densidade de potência, eficiência energética superior e otimização da gestão térmica, buscando apresentar uma solução inovadora de propulsão que atenda às demandas de sustentabilidade e competitividade da indústria moderna.

Cabe ressaltar que a concepção deste projeto de graduação foi idealizada a partir da colaboração entre os autores desta monografia e o projetista Júlio Raimundo. Destaca-se a contribuição essencial de Raimundo na etapa de prototipagem do motor, sendo ele o responsável pela elaboração dos detalhamentos técnicos e desenhos em CAD do protótipo. Contudo, o desenvolvimento das demais fases do trabalho, incluindo a pesquisa aprofundada, o planejamento técnico, a análise de resultados e a redação final deste documento, foi conduzido e concluído integralmente pelos autores.

Para atingir os objetivos propostos, a metodologia deste trabalho foi estruturada em duas frentes principais: uma revisão de literatura e o desenvolvimento de um protótipo. A frente de revisão de literatura consistiu na coleta, leitura e análise crítica de fontes secundárias, incluindo artigos científicos, dissertações, teses, relatórios institucionais e bases estatísticas oficiais. A escolha por essa abordagem bibliográfica justifica-se pela necessidade de reunir, comparar e interpretar diferentes pontos de vista e dados disponíveis sobre o motor *Wankel*. O critério de seleção das fontes considerou a relevância acadêmica dos autores e a pertinência dos estudos frente aos objetivos deste projeto. Dessa forma, buscou-se construir uma base sólida de conhecimentos que permitisse identificar os principais desafios enfrentados na área.

Este trabalho documenta o desenvolvimento do projeto em uma sequência lógica e dividida em quatro capítulos e as considerações finais. O Capítulo 1 contextualiza o tema através de uma revisão da literatura sobre inovação, sustentabilidade industrial e motores elétricos. Em seguida, o Capítulo 2 é

concentrado no objeto de estudo, aprofundando os fundamentos técnicos, o histórico e os princípios de funcionamento do motor *Wankel*.

A fase prática é detalhada no Capítulo 3, que cobre desde o planejamento inicial e a prototipagem em CAD até a estrutura técnica dos componentes. Subsequentemente, o Capítulo 4 avalia a viabilidade econômica do protótipo, com uma análise de custos e propostas de melhorias futuras. O documento é concluído com as Considerações Finais, que resumem os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 INDÚSTRIA, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE

A indústria é, inegavelmente, um pilar estrutural da economia brasileira, com especial destaque para o estado de São Paulo, que concentra um parque fabril vasto e diversificado. Essa robustez histórica é vital para o Produto Interno Bruto (PIB) nacional, mas a manutenção de sua relevância exige que a inovação e a sustentabilidade sejam elevadas a diferenciais competitivos estratégicos (ANFAVEA, 2021).

Segundo Coelho e Abreu (2019), a ascensão do automóvel a combustão interna moldou a economia global, mas teve suas origens em um período de experimentação tecnológica mais ampla. Um exemplo disso é o trabalho de Rudolf Diesel. Em 1900, ele demonstrou que seu motor de ignição por compressão podia, notavelmente, funcionar com óleo de amendoim, indicando a viabilidade inicial de fontes vegetais. Contudo, a produção em escala e a busca por durabilidade levaram à escolha do petróleo filtrado. A massificação do motor diesel após a Segunda Guerra Mundial consolidou essa dependência, pois o uso prolongado de óleo vegetal causava o acúmulo de resíduos de carbono, danificando os motores (Martins, 2013).

As crises do petróleo, a partir dos anos 1970, desvelaram a finitude e a fragilidade dessa dependência, impulsionando a busca por substitutos. Nesse contexto, a importância de tecnologias energéticas eficientes se tornou evidente. O Brasil, por exemplo, investiu no desenvolvimento de bicom bustíveis, uma solução renovável que demonstra a urgência em encontrar alternativas não fósseis (Kutney, 2019).

É nesse quadro que o automóvel elétrico surge. Sua expansão não é apenas tecnológica, mas uma resposta direta aos graves problemas ambientais, de mobilidade urbana e de saúde pública causados pelo padrão de uso de veículos a combustão. A transição para a sustentabilidade no setor energético é vista globalmente como uma rota de crescimento (Geels, 2019).

Internacionalmente, a expansão desse mercado é impulsionada por políticas de incentivo e metas ambiciosas. Essas políticas vão desde subsídios diretos para a compra e redução de impostos, até a criação de quadros regulatórios como o

programa *Zero Emission Vehicle* (ZEV) na Califórnia. Tais arranjos institucionais e marcos regulatório criam o ecossistema necessário para o desenvolvimento do setor (Consoni *et al.*, 2018).

No Brasil, apesar da capacidade industrial em São Paulo, o desempenho na eletrificação da mobilidade é tímido. O país enfrenta um Sistema Tecnológico de Inovação (STI) incipiente e, crucialmente, um marco institucional vago e com poucas redes de atores engajadas. Essa lacuna atua como um bloqueio à entrada e à massificação de tecnologias alternativas. Para que a indústria brasileira mantenha seu papel central, é imperativo que o governo crie um arcabouço regulatório que estimule a inovação e a adoção de tecnologias energéticas eficientes, garantindo a competitividade e o alinhamento do país com a economia global sustentável.

1.2 MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA

Segundo Santos (2020, p. 15):

A indústria global de sistemas de transporte, que por muitas décadas se apoiou em motores de combustão interna pela sua versatilidade e autonomia, está passando por uma profunda transformação. Este movimento é impulsionado por imperativos ambientais urgentes, como a emissão de gases de efeito estufa (GEF) e a poluição atmosférica — que, ao agravar doenças respiratórias, impõe um custo social elevado — e pela finitude dos combustíveis fósseis.

O esforço é, portanto, global: desenvolver soluções de transporte mais eficientes e com uma drástica redução dos níveis de emissões.

Neste cenário, os veículos com propulsão eletrificada (VEs) consolidam-se como a principal alternativa, prometendo benefícios substanciais aos sistemas de transporte. Um VE é caracterizado por ter, no mínimo, uma máquina elétrica (ME) em seu sistema de propulsão e é notável por não emitir poluentes ou gases tóxicos diretamente durante sua operação. É interessante destacar que os VEs, embora pareça uma idealização moderna, possuem um histórico muito mais antigo. Contudo, barreiras como a autonomia limitada e as restrições nas tecnologias de armazenamento e recarga — desafios que, em parte, persistem — fizeram com que a produção em larga escala, como a de Henry Ford no início do século passado, optasse pelos motores de combustão (Neocharge, 2021).

A tecnologia central dos VEs reside na máquina elétrica, que opera com base no fenômeno da indução magnética. Essa máquina eletromecânica transforma a energia elétrica armazenada em energia mecânica de movimento (propulsão). A ME pode atuar tanto como motor elétrico (ME-M) para tração, quanto como gerador elétrico (ME-G). Para isso, o sistema requer um armazenador de energia (AE) — baterias ou supercapacitores — e um processador de energia (PE).

Santos (2020, p. 42) descreve o sistema de armazenamento e processamento de energia:

O sistema AE armazena e disponibiliza a energia por processos químicos ou físicos, enquanto o PE gerencia a transmissão de energia entre a bateria e o motor. Essa transmissão, essencialmente um processamento de energia, é meticulosamente controlada por estratégias de gerenciamento baseadas na eletrônica de potência (EP).

Portanto a EP, que utiliza dispositivos controlados por semicondutores de potência, é o campo onde se concentram as principais tendências de inovação. Os avanços em curso no sistema AE (focados em maior densidade e segurança) e o aprimoramento dos controles de EP (para otimizar a eficiência e a velocidade de recarga) são os vetores que prometem superar as barreiras de autonomia remanescentes e consolidar a propulsão elétrica como o padrão dominante para o futuro do transporte.

2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS E CONCEITUAIS DO MOTOR *WANKEL* ELÉTRICO

2.1 HISTÓRICO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES *WANKEL*

Desenvolvido pelo engenheiro alemão Felix *Wankel* ao longo da década de 1920, o motor rotativo, igualmente denominado motor *Wankel*, surgiu como uma proposta inovadora para superar as limitações dos tradicionais motores de combustão interna baseados no ciclo Otto, bem como dos motores de dois tempos, que dependem de sistemas com pistões e cilindros para transformar a energia química do combustível em movimento mecânico. Incentivado pela busca por soluções mais leves, compactas e com maior eficiência operacional, *Wankel* dedicou-se à concepção de uma arquitetura mecânica alternativa, capaz de oferecer desempenho superior com menor complexidade estrutural (Giacosa, 2000).

Ao invés do movimento alternado característico dos motores convencionais, o projeto de *Wankel* adota um rotor com formato trigonal que gira dentro de uma câmara epicicloidial, gerando três câmaras volumétricas móveis. À medida que o rotor se move, cada uma dessas câmaras passa, uma de cada vez, pelas fases principais do ciclo termodinâmico: entrada de ar ou combustível, compressão, expansão (ou queima) e saída dos gases. Esse funcionamento contínuo proporciona uma operação mais suave, com redução significativa de vibrações e menos componentes móveis em comparação aos motores de pistão (Giacosa, 2000).

Apesar de a patente ter sido registrada em 1929, o aprimoramento técnico e a viabilidade prática do motor enfrentaram longos entraves, agravados pelas consequências da Segunda Guerra Mundial, que interromperam o avanço de diversas pesquisas na Europa. Apenas nas décadas seguintes, especialmente a partir dos anos 1950, foi possível retomar os testes experimentais com consistência. Durante esse período, a parceria com a empresa alemã NSU foi extremamente importante, pois permitiu a produção em grande escala do primeiro motor rotativo funcional, um marco na história da engenharia automotiva (Yamamoto, 1981).

A tecnologia logo despertou interesse internacional, sendo adotada por diferentes fabricantes ao redor do globo. Em 1961, a empresa japonesa Mazda — então conhecida como *Tokyo Kogyo Co.* — Adquiriu os direitos de produção e desenvolvimento do motor *Wankel*, tornando-se a principal defensora e evoluída dessa tecnologia. Ao longo de quase meio século, a montadora japonesa aprimorou

o *design*, aplicando-o em diversos modelos esportivos e de alto desempenho, consolidando sua reputação no segmento automotivo (Martins, 2013).

Um exemplo bem conhecido desse avanço é o Mazda RX-8, lançado no começo dos anos 2000. Ele tinha um motor rotativo com dois rotores, que oferecia uma combinação de potência, leveza e uma resposta dinâmica impressionante. Apesar de ser muito apreciado por entusiastas e críticos, o carro enfrentou dificuldades com as regras ambientais, especialmente relacionadas às emissões de poluentes. Essas exigências mais rigorosas fizeram com que a linha fosse descontinuada posteriormente. Apesar disso, o motor *Wankel* permanece como um marco de inovação, representando uma abordagem ousada e diferenciada na evolução dos sistemas propulsores automotivos (Martins, 2013).

2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES WANKEL

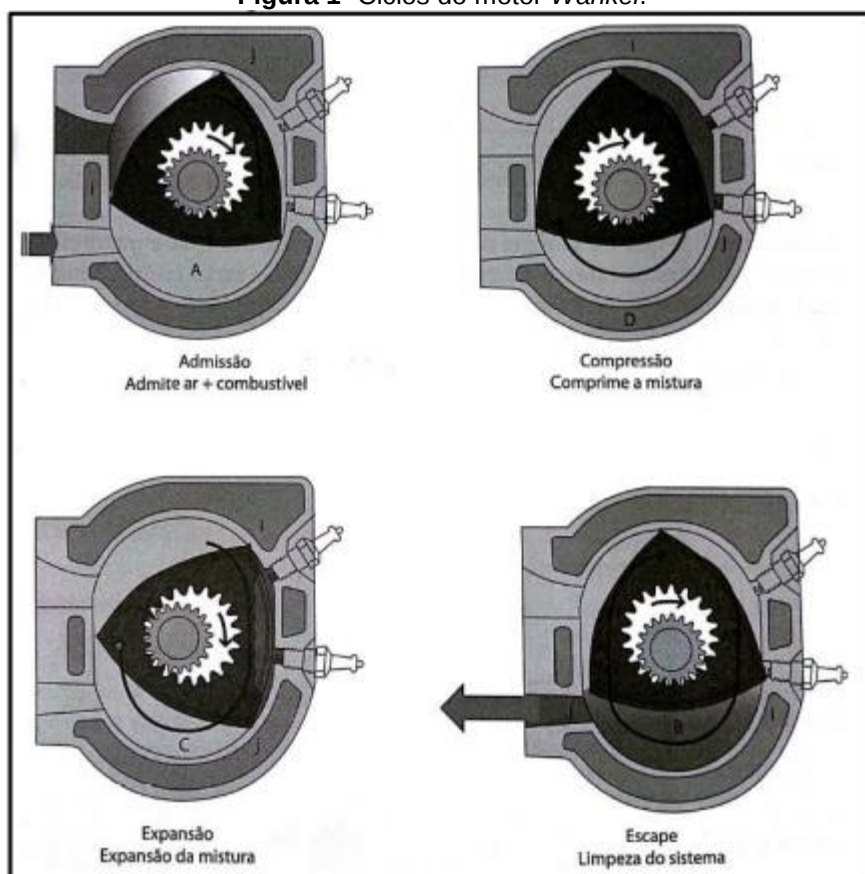
Diferentemente dos motores de ciclo alternativo, cujo funcionamento se baseia no movimento retilíneo e sucessivo de pistões para a realização das fases do ciclo termodinâmico, os motores rotativos operam por meio da rotação contínua de uma componente central, conferindo-lhes características distintas em termos de dinâmica e eficiência. Dentro desse grupo, destaca-se o motor rotativo de êmbolo, mais conhecido como motor *Wankel*, cuja arquitetura inovadora representa uma ruptura com os modelos tradicionais de propulsão.

Um dos aspectos mais notáveis desse sistema é a ausência de válvulas de admissão e escape, responsáveis, nos motores convencionais, pela entrada da mistura ar-combustível e pela saída dos gases pós-combustão. No motor *Wankel*, essas funções são assumidas diretamente pelo próprio rotor, que, ao girar dentro da câmara principal, abre e fecha passagens de forma sincronizada com seu movimento rotacional. Essa integração funcional elimina a necessidade de mecanismos complexos como árvores de comando, balancins e molas de válvulas, reduzindo significativamente o número de componentes móveis e, conseqüentemente, o atrito interno, o peso e a probabilidade de falhas mecânicas (Brunetti, 2012).

O conjunto é composto por um alojamento estacionário, geralmente com formato epitrocoide, no interior do qual um rotor com perfil triangular e faces ligeiramente curvadas executa um movimento excêntrico. Esse rotor está acoplado a

um eixo de saída por meio de um engrenamento interno, garantindo que sua trajetória combine rotação com deslocamento orbital. À medida que o rotor gira, ele cria três câmaras de trabalho variáveis entre suas faces e a parede interna do cárter, cada uma delas passando ciclicamente pelas quatro fases do ciclo: admissão, compressão, expansão e exaustão. Como evidenciado na figura 1 a seguir.

Figura 1- Ciclos do motor *Wankel*.



Fonte: Adaptado de Brunetti, 2012.

Inicialmente, em uma das câmaras, ocorre a admissão da mistura ar-combustível, que é sugada pela expansão do volume à medida que o rotor se afasta do ponto morto. Em seguida, o movimento contínuo do rotor comprime essa mistura na fase seguinte. Ao atingir o ponto de máxima compressão, uma vela de ignição gera uma faísca, provocando a combustão controlada da mistura. A rápida liberação de energia resultante empurra a face do rotor, gerando torque diretamente no eixo de saída. Por fim, na etapa de escape, os gases residuais são expelidos pela abertura de exaustão, concluindo o ciclo. Esse processo se repete de forma contínua e suave em cada uma das três câmaras, proporcionando uma entrega de potência

notavelmente uniforme e com baixos níveis de vibração (Toledo, Ferrari, Vendrame, 2009).

Graças a essa configuração, o motor *Wankel* oferece vantagens como alta potência específica, compactação estrutural e operação silenciosa, embora enfrente desafios relacionados ao desgaste desigual das pontas do rotor e ao consumo de óleo lubrificante. Apesar dessas limitações, sua engenhosidade mecânica continua a ser objeto de estudo e admiração, representando uma alternativa ousada e funcional na evolução dos motores de combustão interna.

2.3 VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DOS MOTORES *WANKEL* ELÉTRICOS

O motor *Wankel* é conhecido por sua estrutura inovadora, que traz vantagens importantes, como um *design* mais compacto e uma mecânica mais simples. Com um número reduzido de componentes móveis em relação aos motores de combustão interna convencionais, apresenta menor peso, menor complexidade construtiva e elevada densidade de potência. Sua operação baseia-se em movimento rotacional contínuo, o que elimina as oscilações típicas dos sistemas com pistões alternativos, resultando em funcionamento notavelmente suave, com baixos níveis de vibração e capacidade de atingir regimes elevados de rotação com segurança.

Apesar desses atributos, o projeto enfrentou limitações técnicas que impactaram sua adoção em larga escala. Problemas estruturais relacionados à vedação nas pontas do rotor — responsáveis por manter a pressão nas câmaras de combustão — ocasionavam perdas de compressão e maior consumo de óleo lubrificante. Adicionalmente, a configuração geométrica da câmara de combustão, alongada e de superfície desigual, dificultava uma queima completa e eficiente da mistura ar-combustível, refletindo-se em menor rendimento térmico, maior consumo de combustível e emissões de poluentes superiores às exigidas por normas modernas de controle ambiental (Rivera; Silva; Castillo, 2008).

Ainda assim, a tecnologia avançou graças ao esforço de desenvolvimento de algumas fabricantes. A NSU, pioneira na produção em série, lançou em 1964 o *NSU Spider*, primeiro automóvel comercial equipado com motor rotativo, marcando um marco na engenharia automotiva. Após a incorporação da NSU pela Auto Union — posteriormente integrada ao grupo Volkswagen —, o projeto foi aprimorado, mas

acabou sendo abandonado na década de 1970 em razão das dificuldades técnicas e das exigências emergentes do mercado (Rivera; Silva; Castillo, 2008).

Entretanto, a tecnologia encontrou em solo japonês seu principal defensor. A Toyo Kogyo Co., atual Mazda, adquiriu a licença de produção entre as poucas empresas interessadas e passou a investir intensamente na evolução do conceito. Um dos marcos desse processo foi o protótipo C111-I, revelado em 1969, dotado de um motor tri-rotor capaz de gerar aproximadamente 280 cavalos. Com estrutura leve em fibra de vidro e *design* aerodinâmico, alcançava velocidades próximas de 260 km/h — um feito notável para a época — embora tenha permanecido apenas na fase experimental (Rivera; Silva; Castillo, 2008).

A maior fase de uso do motor *Wanckel* na indústria de carros aconteceu com o lançamento do Mazda RX-7 em 1978. Apesar de não ser o primeiro veículo da marca com essa propulsão, tornou-se o modelo mais icônico, celebrado por seu equilíbrio dinâmico, relação peso-potência favorável e o característico som metálico e agudo do motor rotativo em altas rotações. Ao longo de décadas, a Mazda manteve o desenvolvimento contínuo da tecnologia, produzindo uma linha consistente de veículos esportivos com motores rotativos até o descontinuação do RX-8 no final dos anos 2000 (Rivera; Silva; Castillo, 2008).

Com o endurecimento das legislações ambientais globais, especialmente no que se refere às emissões de óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos não queimados, aliado à pressão por maior eficiência energética, a maioria dos fabricantes afastou-se da tecnologia. Mesmo assim, o motor *Wanckel* não foi esquecido. Suas características especiais, como o funcionamento silencioso, a leveza e a alta potência em relação ao tamanho, fazem dele uma opção interessante para usos específicos, como unidades auxiliares de energia, aviões leves, carros de corrida e máquinas industriais.

Embora não tenha se consolidado como uma solução dominante na mobilidade automotiva, o motor rotativo permanece como um símbolo de ousadia técnica e criatividade engenheira. Seu conceito continua a inspirar pesquisadores e desenvolvedores que buscam superar suas limitações originais, explorando novos materiais, sistemas de refrigeração avançados e integrações híbridas, mantendo viva a possibilidade de um renascimento tecnológico em contextos futuros de propulsão.

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE DO MODELO DESENVOLVIDO

A fonte energética responsável pelo funcionamento do motor também atua como fornecedora primária para os diversos sistemas elétricos do veículo, sendo essa função desempenhada pela bateria automotiva, representada na figura 2. Este componente fundamental normalmente funciona com uma tensão de 12 volts e tem uma capacidade média de armazenamento de cerca de 5 ampère-horas (Ah). Ele é um acumulador eletroquímico que guarda energia através de reações químicas que podem acontecer de forma reversível. Durante o processo de descarga, essa energia é convertida em eletricidade, disponibilizando a potência necessária para iniciar o motor de arranque e sustentar o funcionamento de dispositivos eletrônicos mesmo com o motor desligado, como alarmes, módulos de controle e sistemas de memória (Martins, 2013).

Figura 2- Bateria Automotiva.



Fonte: Redação Pensamento Verde, 2014.

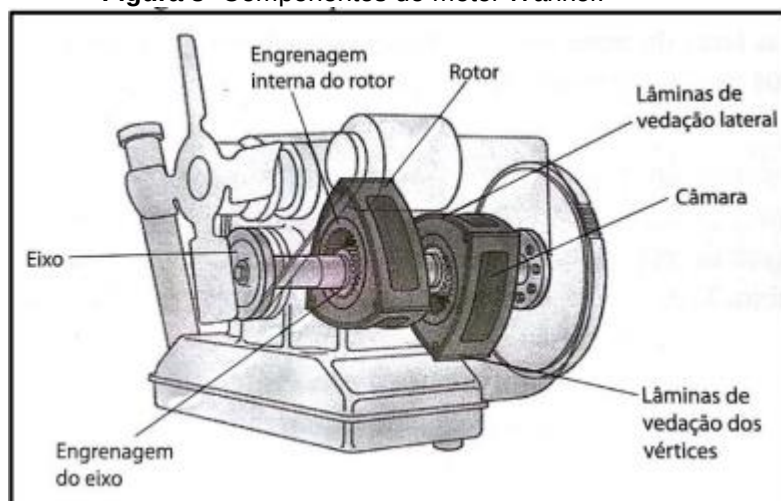
Um dos papéis mais críticos da bateria é suprir a energia necessária para o sistema de ignição, especialmente para as velas de ignição, que, ao receberem uma descarga elétrica de alta tensão, geram uma faísca capaz de inflamar a mistura ar-combustível no interior da câmara de combustão. Esse processo é fundamental para o ciclo termodinâmico que faz o veículo funcionar. Ele segue uma sequência clássica: admissão, compressão, expansão (ou combustão) e exaustão. Na fase de admissão, uma mistura uniforme de ar e vapor de combustível é puxada para dentro da câmara

de combustão. Em seguida, durante a compressão, esse volume é reduzido, elevando-se a pressão e a temperatura da mistura, preparando-a para a ignição (Martins, 2013).

No momento da combustão, a faísca desencadeia uma rápida oxidação exotérmica, liberando uma grande quantidade de energia na forma de aumento de pressão, que se traduz em movimento mecânico. Por fim, na etapa de escape, os gases residuais da queima — compostos majoritariamente por dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), vapor de água (H_2O), óxidos de nitrogênio (NO_x) e derivados de enxofre — são expelidos para o ambiente externo, encerrando o ciclo. Esse processo se repete continuamente, garantindo a operação contínua do motor (Martins, 2013).

No caso do motor *Wankel*, apresentado na figura 3, apesar de seguir os mesmos princípios fundamentais do ciclo de funcionamento dos motores de combustão interna, apresenta particularidades construtivas que influenciam seu desempenho e impacto ambiental.

Figura 3- Componentes do motor *Wankel*.



Fonte: Brunetti, 2012.

Um dos principais desafios reside na fase de exaustão, onde a geometria alongada da câmara e o tempo reduzido de abertura da janela de escape dificultam a evacuação completa dos gases residuais. Esse fator contribui para uma combustão incompleta e, conseqüentemente, para níveis elevados de emissões poluentes em comparação com motores de pistão convencionais, tornando-se um aspecto crítico a ser otimizado em projetos futuros (Brunetti, 2012).

Além disso, segundo Rivera; Silva; Castillo (2008), no caso do motor rotativo, o funcionamento interno das câmaras de trabalho é diferente. À medida que o rotor gira, cada área operacional passa por diferentes partes da carcaça, onde as condições de temperatura e pressão variam bastante. A região destinada à admissão permanece constantemente exposta ao fluxo de ar fresco, o que auxilia no resfriamento local, mitigando os efeitos das altas temperaturas geradas nas fases subsequentes. Nas etapas de compressão e expansão, a pressão dentro dos compartimentos é formada pela combinação de forças centrífugas, causadas pelo movimento rotacional do rotor e pelos selos ao redor, além da pressão gerada pelos gases em combustão, que atuam sobre as paredes internas da câmara. Essa pressão atinge seu valor máximo em posições específicas do ciclo, contribuindo para a eficiência do torque gerado, embora exija materiais e engenhos de vedação altamente resistentes para garantir integridade e durabilidade.

Assim, embora o motor *Wankel* apresente vantagens em termos de suavidade operacional e densidade de potência, sua viabilidade em contextos modernos depende de avanços contínuos na eficiência energética, controle de emissões e gestão térmica, desafios que ainda motivam pesquisas e inovações em engenharia automotiva.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE MOTOR *WANKEL* ELÉTRICO

3.1 PLANEJAMENTO INICIAL E DEFINIÇÃO DO ESCOPO

Iniciado o desenvolvimento do protótipo, foi essencial conduzir um estudo aprofundado para a elaboração de um documento técnico detalhado, voltado à caracterização de um motor elétrico de corrente contínua (CC) com arquitetura inovadora. Este motor experimental foi concebido com base nos princípios operacionais do motor *Wankel*, adaptado para o contexto eletromagnético, visando superar as limitações de desempenho dos motores convencionais. O projeto foi estruturado com foco em eficiência energética, densidade de potência e sustentabilidade térmica, incorporando avanços significativos tanto no arranjo geométrico quanto na seleção de materiais de alta performance. Após a definição das especificações técnicas, foi realizada uma minuciosa etapa de planejamento estratégico em conjunto com o gestor de projetos, delineando as fases de execução, cronograma, alocação de recursos e critérios de validação para assegurar o cumprimento dos objetivos técnicos e funcionais.

Características técnicas principais:

- Tipo do Motor: Motor Elétrico de Corrente Contínua (CC), com arquitetura rotativa otimizada,
- Fundamento Operacional: Funcionamento baseado na dinâmica rotacional inspirada no ciclo *Wankel*,
- Eficiência Projetada: Estimativa de desempenho até três vezes superior ao de motores CC tradicionais, em condições operacionais equivalentes.

Componentes Estruturais e Funcionais:

- Rotores;
- Quantidade: Dois rotores interligados mecanicamente;
- Geometria: Perfil triangular com cantos arredondados, projetado para minimizar vibrações e garantir equilíbrio dinâmico;
- Elementos Magnéticos: Cada rotor é equipado com 60 ímãs permanentes de alta densidade magnética;

- Composição dos Ímãs: Fabricados em liga de neodímio-ferro-boro (NdFeB), escolhida por sua excepcional força coercitiva e resistência à desmagnetização;
- Disposição Magnética: Os ímãs são posicionados de forma radial e equidistante ao longo da superfície periférica dos rotores, formando um padrão alternado de polaridade (N-S) para gerar um campo magnético contínuo e altamente uniforme.

Estator:

- Número de Bobinas: 14 bobinas de cobre;
- Material conduto: Utilização de fio de cobre esmaltado com pureza elevada, reduzindo significativamente as perdas ôhmicas e o aquecimento resistivo;
- Organização Espacial: Montagem radial em disposição equiangular, assegurando uniformidade no campo magnético estacionário e otimizando a interação com os campos rotativos;
- Configuração do Enrolamento: Técnica de enrolamento helicoidal de alta densidade, projetada para maximizar a concentração de fluxo magnético e melhorar a resposta dinâmica do motor

Estrutura Externa (Carcaça):

- Material Estrutural: Emprego de liga de alumínio de alta resistência mecânica e baixa densidade, com tratamento superficial anticorrosivo;
- Design: Formato compacto e aerodinâmico, com contornos otimizados para redução de massa e melhorias na transferência térmica;
- Sistema de Dissipação Térmica: Inclusão de aletas radiais integradas ao corpo da carcaça, aumentando a superfície de troca térmica com o ambiente;
- Ventilação Dinâmica: Furos de geometria sextavada posicionados estrategicamente nas faces laterais, que atuam como dutos de ventilação centrífuga durante a rotação, promovendo resfriamento ativo passivo;
- Isolamento: Aplicação de camadas múltiplas de material dielétrico de alto desempenho entre os componentes eletricamente ativos e a estrutura metálica, prevenindo falhas por curto-circuito e garantindo conformidade com normas de segurança elétrica;

Desempenho Operacional e Controle:

- Velocidade de Operação: Faixa ampla e ajustável, com capacidade de alcançar rotações elevadas (medidas em RPM), graças à baixa inércia rotacional e à eficiência na conversão eletromecânica;
- Torque Gerado: Alta densidade de torque, com curva de saída estável e praticamente livre de oscilações ao longo de toda a faixa de rotação, ideal para aplicações que exigem aceleração suave e resposta linear;
- Sistema de Controle: Implementação de eletrônica de potência com modulação por largura de pulso (PWM), permitindo regulação precisa da velocidade, eficiência energética otimizada e integração com sistemas de automação;
- Gestão Térmica: Sistema de refrigeração passivo altamente eficaz, potencializado pelas aletas e pela ventilação dinâmica. Para operações de longa duração em carga elevada, há previsão de acoplamento com circuitos de refrigeração líquida, ampliando o envelope térmico de operação.

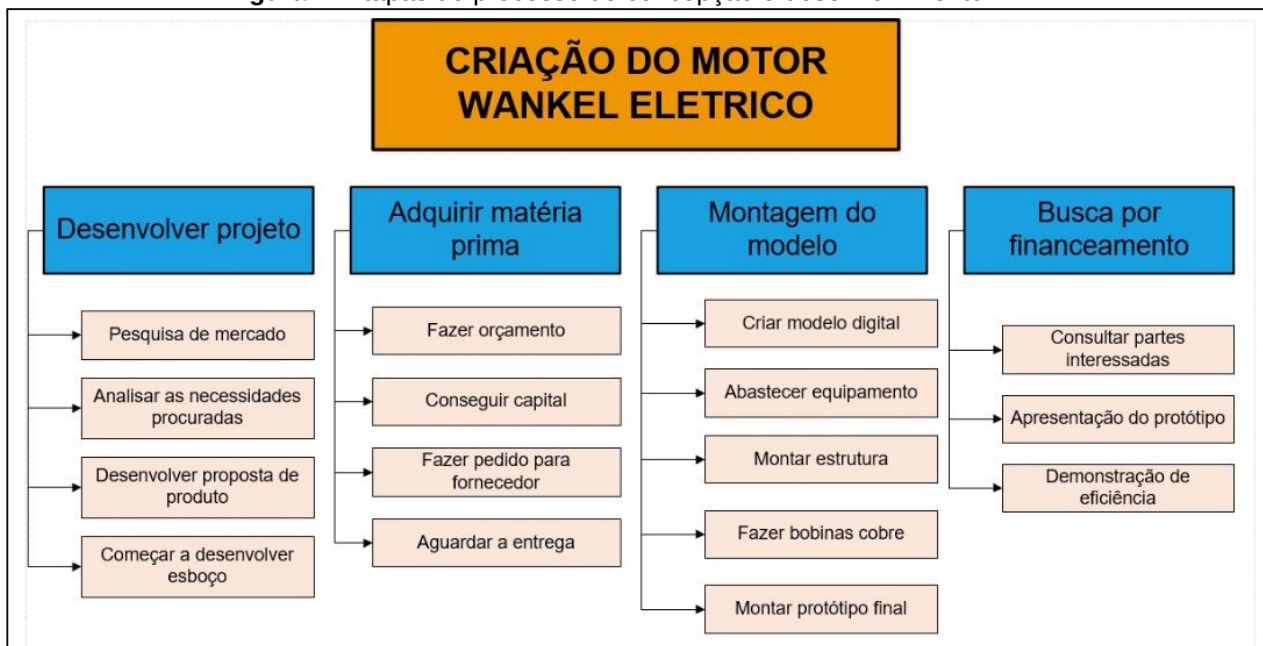
Aplicações Industriais e Tecnológicas:

- Este motor apresenta grande versatilidade e pode ser empregado em diversos setores de alto valor agregado. Em veículos elétricos, sua eficiência superior e torque contínuo contribuem para maior autonomia e desempenho dinâmico. Na indústria manufatureira, mostra-se adequado para máquinas-ferramenta, robôs articulados e sistemas de transporte automatizado, onde o controle preciso de velocidade e a economia energética são críticos. Além disso, seu baixo peso específico e alta relação potência-peso o tornam uma solução promissora para aeronaves leves, drones de grande porte e veículos aéreos não tripulados (VANTs), onde a eficiência propulsiva é um fator determinante para o alcance e tempo de voo.

O conjunto de inovações incorporadas ao projeto reflete um avanço significativo na engenharia de motores elétricos, alinhando desempenho técnico, sustentabilidade térmica e adaptabilidade funcional para atender às demandas de tecnologias emergentes.

3.2 PROTOTIPAGEM

A figura 4 apresentada, detalha a estruturação metodológica do projeto, expondo de forma sistemática todas as fases do desenvolvimento do motor elétrico baseado no princípio *Wankel*:

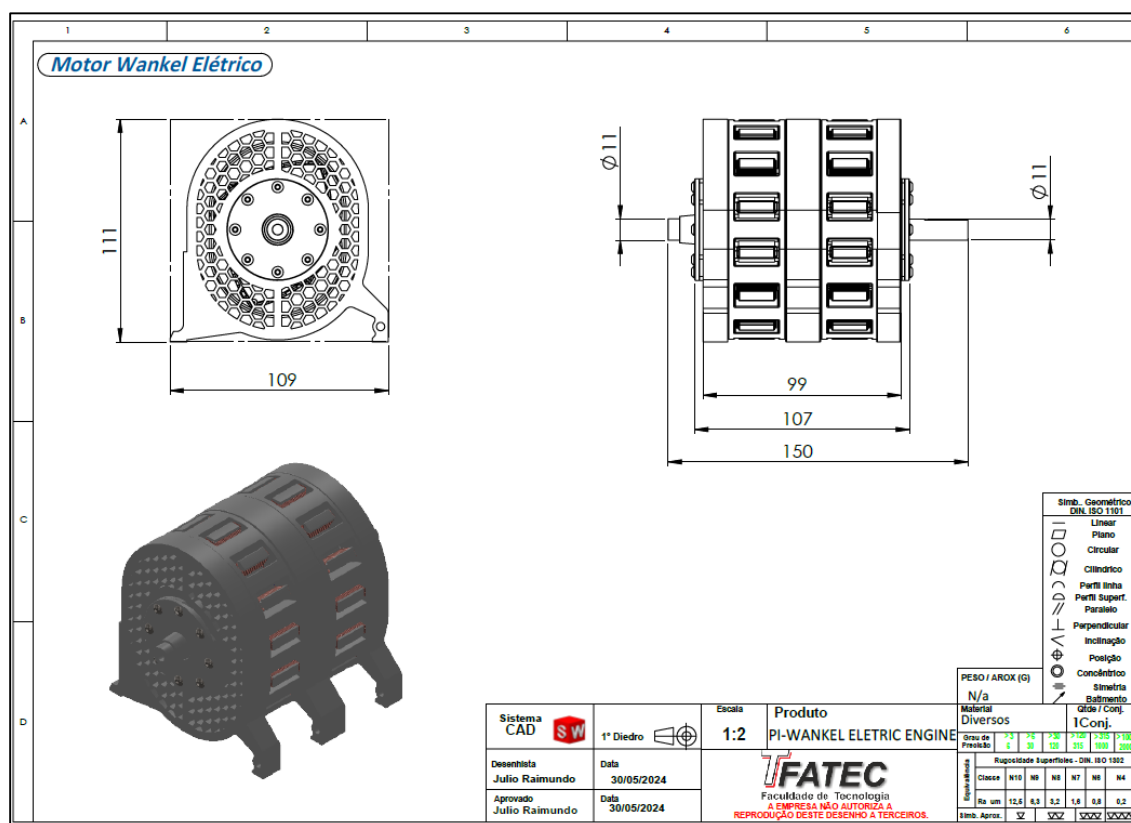
Figura 4- Etapas do processo de concepção e desenvolvimento.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Pode-se verificar que o projeto foi estruturado em quatro grandes etapas, cada uma delas subdividida em atividades específicas, com definição clara de objetivos, responsáveis e critérios de validação. Essa abordagem sistematizada permitiu um acompanhamento eficaz do progresso, garantindo a integridade técnica, a rastreabilidade das decisões de projeto e a otimização do tempo e dos recursos envolvidos.

Na figura 5, é exibido o desenho técnico com as dimensões exatas do motor elétrico de arquitetura *Wankel*, essencial para a compreensão de suas características físicas e integração em sistemas aplicados:

Figura 5- Representação técnica com as dimensões principais do motor elétrico *Wankel*.



Fonte: Raimundo (Projetista), 2024

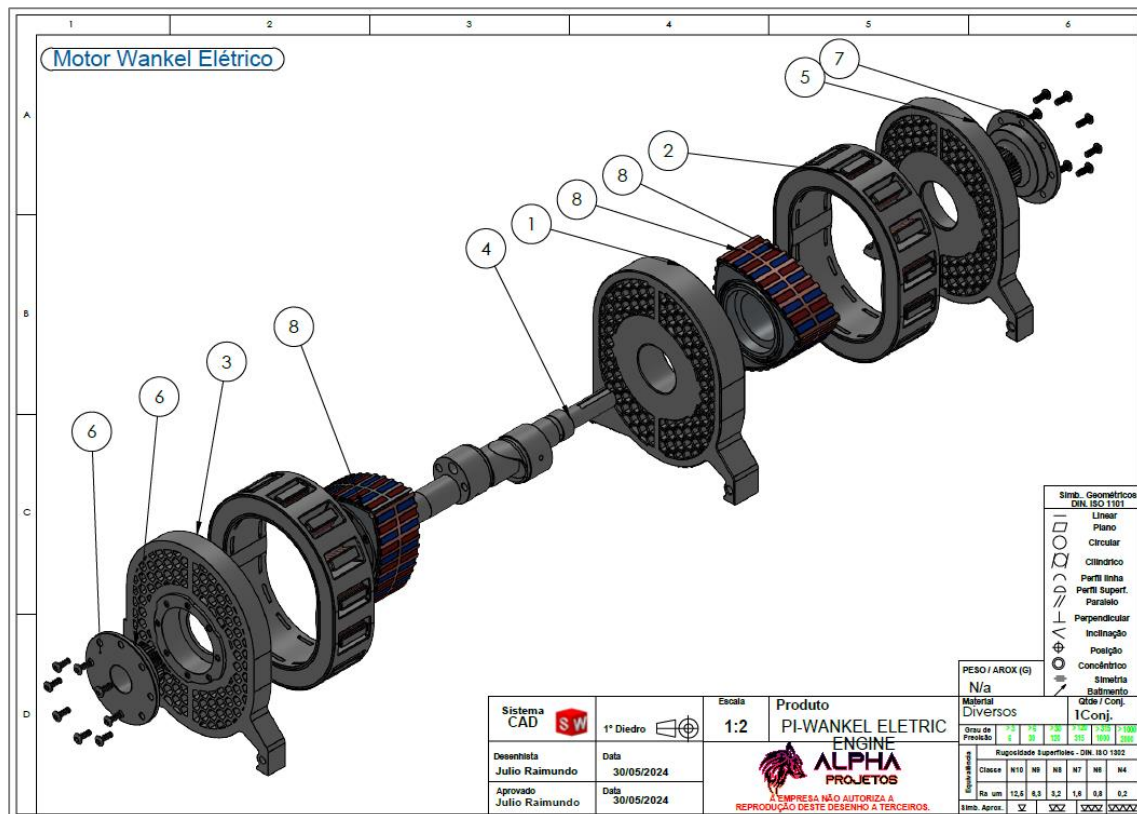
O levantamento dimensional revela as seguintes especificações críticas:

- Dimensões externas totais: O conjunto possui um formato compacto com medidas de 111 mm de largura, 109 mm de altura e 107 mm de profundidade, conferindo ao motor um alto índice de densidade de potência em relação ao volume ocupado;
- Diâmetro do eixo principal: 11 mm, compatível com acoplamentos mecânicos padronizados e adequados para transmissão de torque elevado sem comprometer a rigidez estrutural;
- Comprimento do eixo: 150 mm, projetado para permitir a conexão com redutores, engrenagens ou sistemas de transmissão secundários, ampliando as possibilidades de aplicação.

Essas dimensões são fundamentais para a integração do motor em plataformas reais, como chassis de veículos elétricos, estruturas de máquinas industriais ou fuselagens de aeronaves leves, sendo compatíveis com práticas de engenharia modular.

A figura 6 apresentará a explosão do conjunto montado, oferecendo uma visão tridimensional detalhada de todos os componentes e sua relação espacial:

Figura 6- Vista explodida do motor elétrico Wankel.



Fonte: Raimundo (Projetista), 2024.

Nessa representação, é possível identificar com clareza os elementos constituintes e suas interconexões mecânicas:

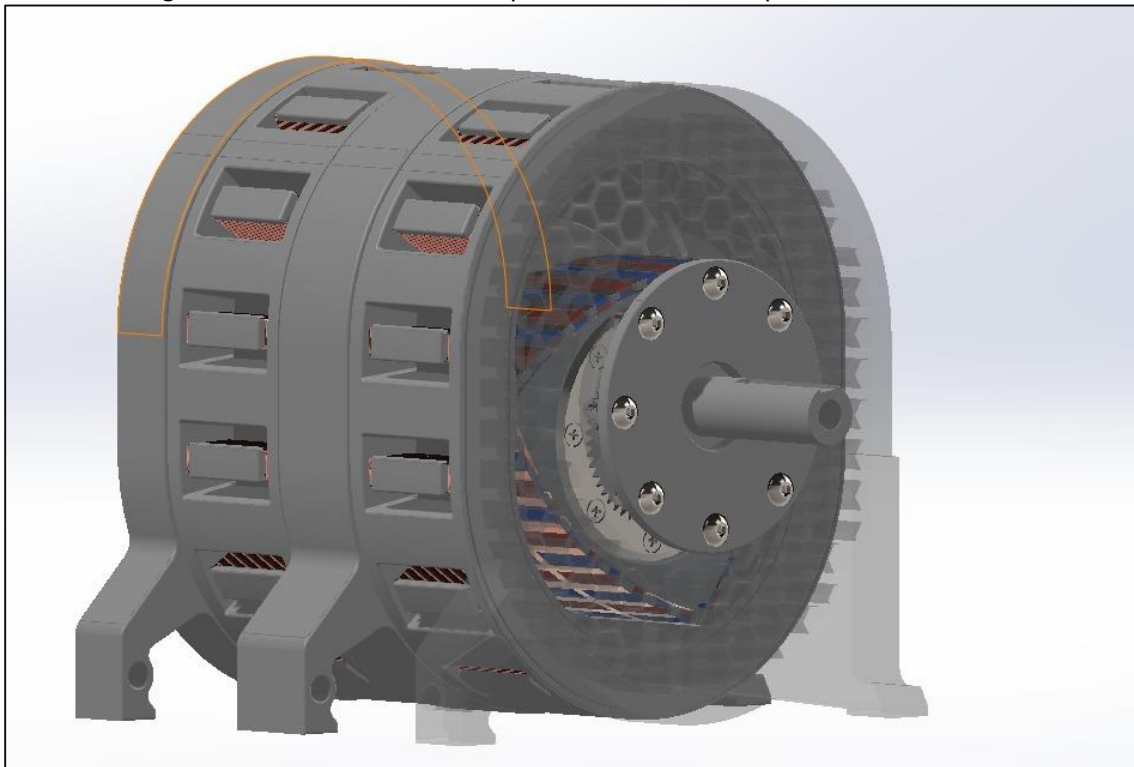
- **Parafusos de fixação:** Utilizados em pontos estratégicos, emprega-se parafusos do tipo Allen com cabeça abaulada, especificação M3 x 8 mm, confeccionados em aço inoxidável, garantindo resistência à corrosão e torque de aperto controlado;
- **Rotores principais:** Dois rotores de geometria triangular, cada um equipado com 30 ímãs de neodímio, posicionados com precisão ao longo da periferia. Cada rotor inclui uma engrenagem integrada de 51 dentes, com módulo 0,6, responsável pela sincronização do movimento rotacional;
- **Bobinas eletromagnéticas:** Um conjunto de 14 bobinas de cobre esmaltado de alta pureza, posicionadas simetricamente dentro da carcaça, responsáveis pela geração do campo magnético dinâmico que interage com os ímãs dos rotores;
- **Carcaça estrutural:** Composta por múltiplas seções intercambiáveis, incluindo a placa central (*center plate*), a carcaça principal com alojamento das

- *Rear plate*: Tampa traseira, com furação para passagem do eixo e pontos de fixação;
- *Front-rear gear-00*: Tampa dotada de engrenagem de 34 dentes (módulo 0,6), utilizada para sincronização e transmissão de movimento;
- Parafuso Allen Cabeça Abaulada M3 x 8mm: Elemento de fixação padrão, utilizado em todas as conexões mecânicas;
- Rotor: Unidade rotativa completa, composta pelo núcleo triangular, ímãs de neodímio e engrenagem de 51 dentes.

Essa lista funcional é essencial para a gestão de estoque, montagem em série, manutenção preditiva e substituição de peças, contribuindo para a escalabilidade e reprodutibilidade do projeto.

A figura 8 subsequente exibe o modelo com a tampa frontal em material transparente, permitindo a visualização interna do funcionamento dinâmico:

Figura 8- Modelo final com tampa frontal translúcida para análise interna.



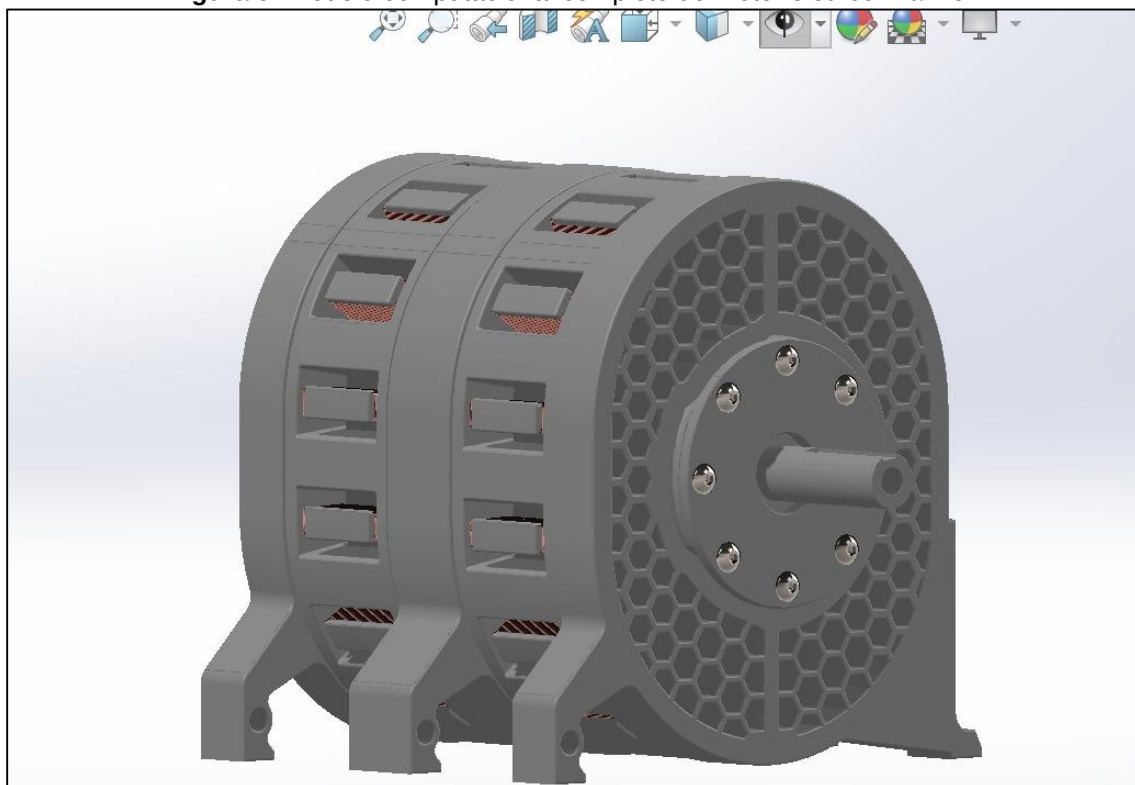
Fonte: Raimundo (Projetista), 2024.

Nesta representação, é possível observar em detalhe os rotores triangulares em operação simulada, cada um equipado com 60 ímãs de neodímio, dispostos em duas camadas longitudinais de 30 unidades cada, com dimensões individuais de 4

mm x 2 mm x 12 mm. A configuração bipolar alternada (norte-sul) maximiza a densidade do campo magnético e minimiza perdas por dispersão. Além disso, a disposição radial e equidistante das bobinas ao redor da cavidade interna evidencia o rigor no projeto eletromagnético, assegurando uma interação eficiente entre os campos estatóricos e rotóricos.

Por fim, a figura 9 é a representação final do motor é apresentada em ambiente de modelagem tridimensional por meio de software CAD de alta precisão.

Figura 9- Modelo computacional completo do motor elétrico *Wankel*.



Fonte: Raimundo (Projetista), 2024.

O projeto digital evidencia as modificações estruturais e funcionais implementadas para viabilizar a conversão eletromecânica no formato *Wankel*. O motor incorpora dois rotores interligados cinematicamente, com dimensões aproximadas de 110 mm x 110 mm, otimizando o espaço interno sem comprometer a potência. A carcaça foi submetida a um processo de otimização térmica, com a inclusão de furos posicionados estrategicamente em padrão hexagonal, que atuam como dutos de ventilação centrífuga durante a rotação, promovendo resfriamento passivo eficiente. Esse detalhe construtivo é fundamental para a estabilidade térmica

em regimes prolongados de carga, evitando superaquecimento e degradação dos materiais magnéticos e isolantes.

O conjunto de representações gráficas e documentações técnicas apresentadas não apenas ilustra o estado avançado do desenvolvimento, mas também demonstra a integração entre projeto mecânico, engenharia elétrica e análise térmica, consolidando uma solução inovadora, funcional e viável para aplicações de alta performance.

3.3 ESTRUTURA TÉCNICA DO PRODUTO: COMPONENTES, MATERIAIS E FUNCIONALIDADE

Os motores elétricos desempenham um papel central em uma ampla gama de aplicações, desde equipamentos industriais de grande porte até dispositivos de uso residencial, destacando-se pela sua eficiência na conversão de energia elétrica em movimento mecânico por meio do princípio do eletromagnetismo. Embora seu funcionamento baseie-se em leis físicas bem estabelecidas, o processo de transformação energética envolve uma engenharia sofisticada, frequentemente mais complexa do que a dos motores de combustão interna, especialmente quando se considera a precisão exigida no controle de campos magnéticos, a sincronização entre rotor e estator e a otimização térmica e dinâmica dos componentes. No desenvolvimento do protótipo de um motor elétrico inspirado na arquitetura *Wankel*, foram selecionados cuidadosamente materiais de alta performance, cada um escolhido com base em suas propriedades mecânicas, térmicas e eletromagnéticas, visando alcançar um equilíbrio ideal entre leveza, durabilidade, resistência ao desgaste e eficiência operacional.

O aço é empregado em elementos estruturais críticos, como o eixo excêntrico e os rolamentos, devido à sua alta resistência mecânica, dureza e capacidade de suportar tensões cíclicas sem deformação plástica. Sua utilização é particularmente vantajosa em regiões do motor submetidas a altas cargas dinâmicas e desgaste abrasivo.

A liga de alumínio é utilizada nas estruturas principais do motor, incluindo o bloco principal e as tampas laterais, por combinar baixa densidade com boa condutividade térmica. Essa característica é fundamental para reduzir a massa total

do sistema, contribuindo para a eficiência energética, especialmente em aplicações móveis como veículos elétricos e aeronaves. Além disso, o alumínio apresenta excelente capacidade de dissipação de calor, o que auxilia na manutenção de temperaturas operacionais seguras.

O ferro fundido é aplicado em componentes sujeitos a elevado desgaste mecânico, como revestimentos internos e partes dos rotores. Sua elevada resistência ao atrito, dureza superficial e capacidade de amortecimento de vibrações tornam-no ideal para aplicações onde o contato contínuo entre superfícies móveis é inevitável. Além de suportar altas pressões e temperaturas, o material contribui para a estabilidade dinâmica do sistema, reduzindo ruídos e oscilações indesejadas durante a operação. Sua usinabilidade também permite a fabricação de peças com formas complexas e ajustes milimétricos, essenciais para o funcionamento contínuo e eficiente do motor.

Materiais cerâmicos, como a zircônia estabilizada com ítria e compostos à base de magnésio, são utilizados em revestimentos de alta performance, especialmente em áreas expostas a temperaturas extremas e atrito intenso. Esses materiais destacam-se por sua extrema dureza, baixo coeficiente de atrito, resistência à oxidação e estabilidade dimensional mesmo em faixas térmicas elevadas. Sua aplicação permite aumentar a eficiência térmica do sistema, reduzindo perdas por condução e prolongando a vida útil dos componentes adjacentes.

Componentes expostos a ambientes corrosivos ou temperaturas elevadas, como os selos de vedação (*apex seals*) e conexões estruturais, são fabricados em aço inoxidável, especificamente na versão 304, reconhecida por sua excelente resistência à corrosão, durabilidade e estética.

Os segmentos de vedação, responsáveis por manter a pressão entre o rotor e a câmara, são frequentemente confeccionados em grafite ou compósitos de carbono reforçado. Esses materiais são escolhidos por sua auto lubrificação, resistência ao choque térmico, baixo desgaste e condutividade térmica adequada. Sua flexibilidade e resistência mecânica contribuem para uma operação silenciosa e com mínima fricção.

Revestimentos especiais feitos com ligas de níquel-cromo são aplicados em áreas de alta exigência térmica e mecânica, como superfícies de contato rotativo e zonas próximas ao núcleo do campo magnético. Peças produzidas com essas ligas,

que oferecem resistência excepcional à oxidação, fadiga térmica e corrosão por agentes alcalinos, como hidróxidos. Além disso, mantêm suas propriedades mecânicas em uma ampla faixa de temperaturas, desde condições criogênicas até ambientes superaquecidos, o que as torna ideais para aplicações de alto desempenho.

Durante a fase de desenvolvimento, foram utilizadas resinas poliméricas de engenharia, especialmente do tipo Standard, compatíveis com tecnologias de impressão 3D por estereolitografia (SLA) e DLP (*Digital Light Processing*). Essas resinas permitem a fabricação de protótipos com alto grau de precisão dimensional, bom acabamento superficial e resistência mecânica suficiente para testes funcionais preliminares. O modelo inclui uma engrenagem central fixa, ao redor da qual os rotores triangulares giram de forma sincronizada, simulando o comportamento real do motor. Esse protótipo foi fundamental para a análise cinemática, ajuste de folgas e verificação da viabilidade do conceito antes da fabricação em materiais definitivos.

O projeto foi concebido com base na arquitetura inovadora do motor rotativo *Wankel*, adaptada para operação elétrica. A estrutura principal do rotor, de formato triangular com vértices arredondados, gira de maneira excêntrica dentro de uma câmara de perfil epitrocoide, gerando variações contínuas de volume que permitem a conversão eficiente de energia. Ao contrário dos motores convencionais com pistões alternativos, este sistema elimina componentes móveis complexos, reduzindo o número de peças, o atrito interno e o ruído operacional. Cada face do rotor executa simultaneamente uma fase diferente do ciclo — admissão, compressão, expansão e exaustão — garantindo uma entrega de potência suave e contínua. Essa característica única, aliada ao baixo peso e alta densidade de potência, torna o motor especialmente adequado para aplicações onde eficiência, compactação e desempenho dinâmico são prioridades.

A combinação criteriosa de materiais avançados, o rigor no projeto estrutural e a fidelidade ao princípio rotativo original resultaram em um sistema eletromecânico altamente eficiente, com potencial para revolucionar aplicações em mobilidade elétrica, indústria de precisão e tecnologias de propulsão sustentável.

3.4 RESULTADOS OBTIDOS E AVALIAÇÃO TÉCNICA DO PROTÓTIPO

O desenvolvimento do protótipo de motor elétrico baseado na arquitetura rotativa *Wankel* teve como objetivo principal a criação de uma solução tecnológica inovadora capaz de superar limitações comuns em motores convencionais, especialmente no que se refere à eficiência energética, durabilidade e sustentabilidade operacional. A avaliação inicial do protótipo revelou que, embora as expectativas de densidade de torque em baixas rotações tenham sido plenamente atendidas, a eficiência global em regime de alta potência implicou na identificação de limitações cruciais. Dentre elas, destacam-se a dissipação térmica em operação contínua e a otimização da vedação dinâmica dos ápices do rotor, desafiando a resiliência do sistema. Inspirado no princípio de funcionamento de três fases do motor *Wankel* clássico, o projeto foi adaptado para operação eletromecânica, substituindo a combustão interna pela excitação magnética controlada, o que permite uma conversão direta e contínua de energia elétrica em movimento rotacional suave e eficiente.

O processo de concepção iniciou-se com a modelagem digital em duas dimensões, utilizando *software* especializado em projetos de engenharia, que permitiu a definição precisa das geometrias, tolerâncias e interações entre os componentes. Essa etapa foi fundamental para a validação prévia do conceito, garantindo compatibilidade entre as partes móveis e fixas, bem como o correto alinhamento do eixo excêntrico, dos rotores triangulares e das bobinas estatóricas. A escala do protótipo foi reduzida em relação a aplicações industriais plenas, visando a viabilidade de testes laboratoriais e a economia de recursos, sem, contudo, comprometer a intensidade do campo magnético ou a densidade de corrente necessária para a geração de torque efetivo. O desempenho será inequivocamente comprovado mediante a aplicação de métricas rigorosas, como a Eficiência Eletromecânica Total, Testes de Torque-Velocidade em Dinamômetro e Análises de Ciclagem de Carga, essenciais para validar sua robustez operacional e longevidade.

Na fase de fabricação, os componentes estruturais foram produzidos por meio de impressão 3D de alta precisão, utilizando resina cerâmica reforçada, um material escolhido por sua resistência térmica, estabilidade dimensional e baixo coeficiente de expansão térmica. Esse tipo de resina permite a criação de peças complexas com acabamento superficial refinado, essencial para garantir vedação adequada e minimizar perdas por atrito. A carcaça, as placas laterais e os alojamentos internos

foram fabricados com essa tecnologia, conferindo ao protótipo um alto grau de integridade estrutural e leveza, apesar da resiliência do insumo à fadiga térmica sob ciclos intensos de operação representar uma limitação inerente que demandará validações subsequentes.

Posteriormente, foram integrados os elementos funcionais essenciais ao desempenho eletromagnético. Bobinas de cobre esmaltado de alta pureza foram enroladas com densidade otimizada e posicionadas simetricamente ao redor da câmara interna, formando o estator fixo. O cobre, por sua excelente condutividade elétrica, minimiza as perdas resistivas e maximiza a eficiência na conversão de energia. Para comprovar a minimização dessas perdas e a eficácia na conversão, serão aplicados Testes de Análise de Potência e Medição de Temperatura por Termografia, visando o registro fiel da Eficiência Térmica e da Densidade de Fluxo Magnético do sistema. Conectores elétricos de baixa resistência foram instalados para garantir a alimentação estável do sistema, enquanto laminados de alumínio de alta pureza foram montados na região interna para compor a superfície da câmara rotativa, oferecendo boa condutividade térmica e resistência à oxidação.

4 VIABILIDADE ECONÔMICA E PROPOSTAS DE MELHORIA

4.1 GERENCIAMENTO DE CUSTOS

O custo estimado para a fabricação de um motor elétrico baseado na arquitetura *Wankel* leva em consideração um conjunto de componentes de alta performance e processos técnicos especializados, refletindo tanto a complexidade do projeto quanto a qualidade dos materiais empregados. O sistema é estruturado principalmente por dois rotores rotativos, cada um equipado com 60 ímãs permanentes de neodímio (liga NdFeB), escolhidos por sua excepcional densidade magnética, resistência à desmagnetização e eficiência na conversão eletromecânica. Esses rotores representam uma parcela significativa do investimento devido ao alto valor do material magnético e à precisão exigida na usinagem e fixação dos ímãs em arranjo radial e polaridade alternada.

O estator, responsável pela geração do campo magnético dinâmico, é composto por 14 bobinas confeccionadas com fio de cobre esmaltado de alta pureza, dispostas simetricamente ao redor da câmara interna. O cobre, por sua elevada condutividade elétrica, minimiza perdas por efeito Joule, mas também contribui para o custo total devido ao preço do metal e ao processo de enrolamento meticuloso, que exige automação ou mão de obra qualificada para garantir uniformidade e isolamento adequado entre espiras.

Dessa forma, a projeção financeira abrange não apenas o valor dos insumos primários, mas também todos os estágios do ciclo produtivo — desde a aquisição de matérias-primas até a validação final do produto — refletindo um processo de desenvolvimento tecnologicamente avançado, voltado para alta confiabilidade, eficiência energética e aplicabilidade em sistemas de alta performance.

4.2 ESTIMATIVAS DE CUSTO E ANÁLISE ORÇAMENTÁRIA

A etapa inicial para a concretização do orçamento envolve a desagregação detalhada de todos os insumos e recursos necessários ao desenvolvimento do projeto, abrangendo materiais, processos de fabricação, mão de obra especializada, equipamentos de apoio e atividades de validação. Um mapeamento minucioso e

tecnicamente fundamentado desses elementos permite estabelecer uma projeção financeira mais precisa, facilitando o controle orçamentário e a alocação estratégica de recursos ao longo das fases de execução. Esse nível de detalhamento é fundamental para antecipar eventuais imprevistos operacionais ou variações de custo, como oscilações no preço de matérias-primas, necessidade de retrabalho ou ajustes de engenharia, evitando desvios significativos entre o planejado e o efetivamente executado. Assim, garante-se uma gestão financeira transparente e alinhada ao cronograma físico do projeto, assegurando a compatibilidade entre as metas técnicas e a disponibilidade orçamentária.

Tabela 1- Detalhamento de custos.

COMPONENTE	QUANTIDADE	VALOR TOTAL (R\$)
Resina de Cerâmica	01	299,90
Ímãs de Neodímio 4x2x12	120	170,00
Guias cromados 1/8"	06	120,00
Chapas de alumínio do rotor	28	380,00
Cola de Alumínio	01	65,00
Fonte chaveada 12v	01	39,90
Bobinas de Cobre	01	80,00
Dimmer rotativo 3000W	01	28,00
Regulador Retificador 12V	02	279,90
Parafusos em geral	01	80,00
Usinagem de rotores	02	1440,00
TOTAL		2.982,70

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Com base nessa estruturação criteriosa, o valor total estimado para a fabricação de um motor elétrico de arquitetura *Wankel*, com as especificações técnicas definidas — incluindo dois rotores com ímãs de neodímio, estator com 14 bobinas de cobre esmaltado, carcaça em liga de alumínio com sistema de dissipação térmica integrado, além dos componentes estruturais e de montagem — foi calculado em R\$ 2.982,70 (dois mil novecentos e oitenta e dois reais e setenta centavos). Esse montante contempla não apenas o custo direto dos materiais, mas também despesas com usinagem de precisão, processos de montagem controlada, testes funcionais e validação técnica, refletindo uma abordagem abrangente e realista do investimento necessário.

No quesito de Custo de Protótipo (Unitário), o valor de R\$ 2.982,70 demonstra uma notável eficiência na gestão de recursos. Este investimento na inovação, que inclui componentes de alta tecnologia (ímãs de neodímio, manufatura aditiva), está abaixo da faixa de custo de motores a combustão interna (IC) especializada (R\$ 4.500,00 - R\$ 6.000,00) e é competitivo ou até mais vantajoso quando comparado a motores radiais elétricos de alta densidade (R\$ 3.500,00 - R\$ 5.500,00). Isso sinaliza que a metodologia de prototipagem adotada, apesar da complexidade da arquitetura, é financeiramente viável e otimizada (Benchmarking Setorial E Cotação De Mercado, 2024)

A administração eficaz desse orçamento é um fator determinante para a sustentabilidade econômica do projeto, especialmente em fases de prototipagem e escalonamento. A previsão clara dos gastos permite a identificação de possíveis economias, a priorização de componentes críticos e a busca por fornecedores com melhor relação custo-benefício, sem comprometer a qualidade ou o desempenho do sistema. Além disso, constitui uma base sólida para futuras análises de viabilidade industrial, produção em escala e eventual comercialização do produto, posicionando o projeto como uma solução tecnicamente robusta e financeiramente equilibrada.

4.3 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O motor elétrico experimental desenvolvido configura-se como uma proposta disruptiva no campo da eletromecânica, representando uma evolução significativa em relação aos modelos convencionais. Sua principal inovação reside no arranjo cinemático exclusivo, no qual o movimento rotativo do rotor triangular é convertido em três giros completos no eixo de saída para cada rotação integral do rotor, graças a um sistema de engrenamento interno altamente sincronizado. Esse mecanismo multiplica a velocidade de saída sem a necessidade de redutores externos, otimizando a transmissão de potência e elevando consideravelmente a eficiência na conversão de energia elétrica em trabalho mecânico.

Apesar do alto potencial técnico e das vantagens operacionais demonstradas, o projeto enfrenta um desafio crítico relacionado ao custo de produção na fase atual de desenvolvimento. A utilização de materiais de alto desempenho — como ímãs de neodímio, ligas de alumínio usinadas com precisão e componentes magnéticos e

estruturais fabricados sob tolerâncias rigorosas — aliada aos processos de montagem especializados e à baixa escala de produção, resulta em um custo unitário elevado. Esse fator torna inviável, no momento, a fabricação em larga escala ou a comercialização acessível, especialmente para equipes de pesquisa ou startups com recursos limitados.

Diante desse cenário, a continuidade e a evolução do projeto dependem diretamente de apoio financeiro externo, seja por meio de editais de fomento à inovação, parcerias com instituições de pesquisa, investimentos de capital de risco ou patrocínios industriais. Sem esse respaldo, a transição do protótipo funcional para um produto industrializado se mostra altamente restrita, limitando a capacidade de validação em campo, certificação técnica e escalonamento produtivo. Assim, embora o conceito demonstre viabilidade técnica e promessa transformadora, sua concretização plena permanece condicionada à obtenção de recursos que permitam superar as barreiras econômicas inerentes ao desenvolvimento de tecnologias emergentes de alto valor agregado.

4.4 PROPOSTA DE MELHORIA

Com o objetivo de otimizar o desempenho técnico e racionalizar os custos envolvidos no desenvolvimento do motor elétrico experimental, foram identificadas estratégias de aprimoramento a serem incorporadas na próxima fase do projeto. Tais iniciativas visam elevar a eficiência operacional, prolongar a durabilidade dos componentes e reduzir os gastos associados à fabricação de protótipos, especialmente em estágios iniciais de validação.

Uma das propostas centrais é a substituição dos rolamentos convencionais por unidades de cerâmica avançada, compostas por esferas de nitreto de silício ou zircônia, montadas em aros de aço inoxidável ou ligas leves. Esses rolamentos cerâmicos oferecem vantagens significativas em relação aos modelos tradicionais: apresentam menor coeficiente de atrito, reduzida massa específica, ausência de condutividade elétrica e alta resistência ao desgaste e à corrosão. Ao serem integrados ao suporte do eixo principal, permitem uma rotação mais suave e com menor resistência mecânica, minimizando perdas por atrito e dissipando menos calor durante o funcionamento. Esse ganho se traduz em maior eficiência energética,

redução do aquecimento indesejado no núcleo do motor e extensão da vida útil dos componentes rotativos, especialmente em regimes de operação prolongada ou sob carga elevada.

Outra medida estratégica envolve a adoção de uma abordagem modular e iterativa para a prototipagem, priorizando a construção de versões simplificadas do motor para testes funcionais preliminares. Em vez de depender de peças usinadas ou fundidas com alto grau de precisão desde o início, será viabilizada uma configuração experimental que utilize ímãs pré-fabricados e estruturas montáveis, permitindo a simulação do comportamento eletromecânico sem a necessidade de investimentos elevados em fabricação. Essa etapa funcional permite a validação do conceito de conversão de energia, análise da dinâmica rotacional, ajuste de alinhamento e detecção precoce de falhas de projeto, tudo isso com custos significativamente reduzidos.

Além disso, será intensificado o uso de tecnologias de prototipagem rápida, especialmente a impressão 3D com resinas de engenharia e filamentos de alto desempenho, para a produção de componentes não estruturais ou de baixa solicitação mecânica, como carcaças auxiliares, suportes, tampas e guias. Essa metodologia acelera o ciclo de desenvolvimento, permite ajustes ágeis e reduz o desperdício de materiais nobres em fases de teste. A montagem de protótipos funcionais de baixo custo, com foco em desempenho e validação técnica, torna-se assim uma etapa essencial para a evolução controlada e economicamente sustentável do projeto.

Essas melhorias, quando implementadas de forma integrada, têm o potencial de transformar o projeto em uma solução mais acessível, tecnicamente robusta e escalável. Ao equilibrar inovação com viabilidade econômica, o desenvolvimento avança rumo a um protótipo final mais eficiente, durável e alinhado às exigências de aplicações reais, ao mesmo tempo em que se torna mais atrativo para possíveis parcerias, investimentos e futura produção em escala.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do Motor *Wankel* Elétrico demonstrou ser um sucesso conceitual, comprovando a viabilidade técnica de um motor elétrico rotativo de alta densidade de potência. O objetivo de concepção foi plenamente alcançado, fornecendo um projeto detalhado que prevê uma eficiência até três vezes superior aos motores CC convencionais.

O objetivo central de conceber e detalhar um motor elétrico de Corrente Contínua (CC) com arquitetura rotativa inspirada no princípio *Wankel* foi plenamente alcançado no plano conceitual e de engenharia. O resultado foi um conjunto de especificações técnicas detalhadas que confirmam a viabilidade de um motor com eficiência projetada até três vezes superior aos motores CC tradicionais, cumprindo a fase de design essencial para a próxima etapa de prototipagem.

O motor *Wankel* elétrico possui uma relevância estratégica para a Gestão da Produção Industrial (GPI) e o setor de mobilidade. A sua arquitetura herda as vantagens de alta densidade de potência, estrutura compacta e leve, e operação suave, tornando-o ideal para aplicações de alto valor agregado, como veículos elétricos (VEs) de performance, máquinas-ferramenta e, particularmente, em aeronaves leves (VANTS). Ao propor uma solução de propulsão eletrificada, o projeto também contribui diretamente para a transição energética global, oferecendo um caminho para a zero emissão direta de poluentes (GEF) e alinhando-se aos imperativos ambientais urgentes.

O projeto é um caso exemplar da aplicação dos princípios da GPI, integrando Planejamento e Controle da Produção (PCP) através de uma metodologia rigorosa, e estabelecendo Padrões de Qualidade por meio do detalhamento técnico e da especificação de materiais, preparando o motor para uma potencial produção em série e otimização da manutenção preditiva.

Durante a execução do projeto, foram identificados desafios significativos. A principal dificuldade reside no elevado custo de produção do protótipo, impulsionado pelo valor de materiais de alto desempenho, como os ímãs de neodímio, e pela necessidade de usinagem de precisão. Esse fator financeiro torna a fabricação em larga escala inviável sem apoio externo. Tecnicamente, destacam-se limitações que

exigem otimização futura, como a gestão da dissipação térmica em operação contínua e a eficiência da vedação dinâmica dos rotores.

Como proposta para trabalhos futuros e continuidade desta pesquisa, recomenda-se a exploração de melhorias que visam otimizar tanto o custo quanto a performance. Sugere-se a substituição dos rolamentos convencionais por unidades de cerâmica avançada, que reduzem o atrito e melhoram a eficiência térmica. Além disso, propõe-se a adoção de uma abordagem de prototipagem rápida e modular, utilizando impressão 3D e ímãs pré-fabricados, permitindo a realização de testes funcionais com um custo de validação significativamente reduzido, acelerando o ciclo de desenvolvimento e a viabilidade comercial do motor.

REFERÊNCIAS

ANFAVEA. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. São Paulo: AutoData Editora, 2021.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2012^a.

CARLSSON, B.; STANKIEWICZ, R. On the nature, function and composition of technological systems. **Journal of Evolutionary Economics**, Berlin, v. 1, n. 1, p. 93-118, 1991.

COELHO, P.; ABREU, M. Transição sociotecnológica para a mobilidade urbana sustentável no Brasil. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 12, p. 1227-1241, 2019.

CONSONI, F. L. *et al.* **Estudo de governança e políticas públicas para veículos elétricos**. Campinas: LEVE/ DPCT/ UNICAMP, 2018.

COSTA, J. O. P. Normalização para a inovação: o programa brasileiro de etiquetagem veicular (PBE-V). In: RAUEN, A. T. (Org.). **Políticas de inovação pelo lado da demanda no Brasil**. Brasília: Ipea, 2017. p. 121-177.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS – FGV. **Carros elétricos**. Cadernos FGV Energia, Rio de Janeiro, v. 4, n. 7, p. 1, 2017.

GEELS, F. Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the multi-level perspective. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Amsterdam, v. 39, p. 187-201, 2019.

GIACOSA, D. **Motori Endotermici**. 15 ed. Milano, 2000.

JACOBSSON, S.; BERGEK, A. Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology. **Industrial and Corporate Change**, London, v. 3, n. 5, p. 815-849, 2004.

KUTNEY, P. Indústria automotiva toma o rumo da Rota 2030: Rota 2030 estimula a evolução tecnológica nas linhas de produção no País. **Automotive Business**, 15 abr. 2019. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/29055/industria-automotivatoma-o-rumo-da-rota-2030>>. Acesso em: 24 setembro 2025.

LUCINDA, C. R.; PEREIRA, L. M. S. Efeitos da política de redução do IPI sobre o mercado de automóveis novos. In: **ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS CENTROS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA**, 45., 2017, Natal. Anais... Niterói: ANPEC, 2017.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 4 ed. Publindústria, 2013.

RIVERA. D.A.; SILVA.Y.M.; CASTILLO.A., **Motor Rotativo Tipo Wankel**. Disponível em:< <https://sites.google.com/site/mvwankel/Home>>. Acesso em: 15 agosto, 2025.

TOLEDO, L. L; FERRARI, L.H.J; VENDRAME, Saímon. **Motor rotativo Wankel**. 2009. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha solteira, 2009.

WOLFFENBUTTEL, R. **A produção social da inovação**: o automóvel elétrico e as redes de inovação no Brasil. Porto Alegre: Cirkula, 2021.

Yamamoto, K. **Rotary Engine**. Tokyo: Sankaido, 1981.