

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS –
CAMPUS DE GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOSÉ MAURÍCIO BEIRA DE ASSUNÇÃO JUNIOR

PROJETO CONSTRUTIVO DE MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL PARA
CARRO HÍBRIDO

Goiânia, 2021

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese
☐ Dissertação
☐ Monografia – Especialização
☒ TCC - Graduação
☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | ☐ Artigo Científico
☐ Capítulo de Livro
☐ Livro
☐ Trabalho Apresentado em Evento |
|--|---|

Nome Completo do Autor: José Maurício Beira de Assunção Junior

Matrícula: 20171011060179

Título do Trabalho: PROJETO CONSTRUTIVO DE MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL PARA CARRO HÍBRIDO.

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

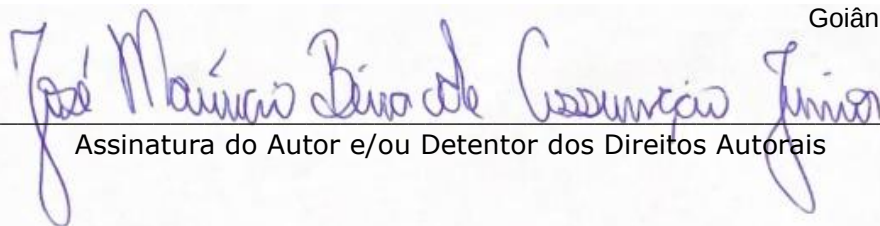
- () O documento está sujeito a registro de patente.
 () O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
 () Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 19/04/2022.



 Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

JOSÉ MAURÍCIO BEIRA DE ASSUNÇÃO JUNIOR

PROJETO DE MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL PARA CARRO HÍBRIDO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Departamento de Áreas Acadêmicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – *Campus Goiânia* como requisito parcial para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias

GOIÂNIA

2021

As79p Assunção Júnior, José Maurício Beira de.
Projeto construtivo de máquina a relutância variável para carro híbrido / José Maurício Beira de Assunção Júnior. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2022.
57 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento das Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.
Inclui anexos.

1. Máquina a relutância variável. 2. Veículo híbrido. 3. Projeto de Máquinas Elétricas. I. Dias, Renato Jayme (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 620

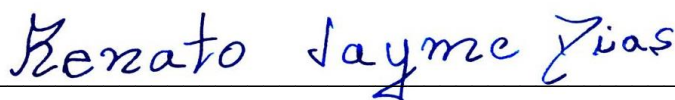
Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

JOSÉ MAURÍCIO BEIRA DE ASSUNÇÃO JUNIOR

PROJETO CONSTRUTIVO DE MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL
PARA CARRO HÍBRIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia.

Aprovado em 08 de fevereiro de 2022.



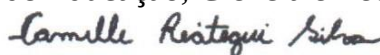
Prof.: Dr. Renato Jayme Dias (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Prof.: Me. Charles dos Santos Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Prof.: Me, Camille Reátegui Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

GOIÂNIA 2022

Agradecimentos

Este trabalho representa, em forma de texto e conhecimento, um longo caminho até aqui de estudo, dedicação, foco e luta. Neste caminho, diversas pessoas fizeram parte e me ajudaram de alguma forma.

Dedico primeiramente as três pessoas que mais amo nesse mundo. Aos que me ensinaram a ser uma pessoa justa, batalhadora e vencedora, cuidaram de mim e renunciaram a muito por mim, meu pai José Maurício Assunção e minha mãe Ilda Francisca Assunção (que vai me fazer uma falta eterna). E ao que, mesmo sendo mais novo que eu, me ensinou muito sobre resiliência, disciplina e foco para chegar aos nossos objetivos, meu irmão Marcos Paulo Assunção.

Às pessoas que me circularam atualmente, como minha namorada Milena Gomes que me ajuda, me acalma, me incentiva e me inspira a ser uma pessoa, irmão, filho e profissional melhor. Também ao Davi Brandão e Sávio Santos que me deram suporte e paciência no início da minha vida profissional da engenharia.

Aos meus amigos que me ajudavam a pensar fora da caixa e evoluir como pessoa e ser humano. À minha família que me deu o suporte necessário quando possível.

Falando não de pessoas, mas de anjos, dedico também às minhas cachorrinhas que em toda minha vida me ajudaram a passar por todos os tipos de momentos: difíceis, fáceis, felizes, tristes etc. Lilica, Pituka e Marie (falecidas) e Amy.

Agradeço o Dr. Prof. Renato Jayme pelo suporte para a escrita e pesquisa deste trabalho, pela atenção também na vida pessoal dos seus orientandos e às aulas magníficas durante toda a graduação. Aos meus amigos e colegas de pesquisa, em especial ao Gustavo Vergara e Danielle Bernardes.

Por último, mas não menos importante, agradeço a Deus pelas bênçãos em minha vida, por ter força, inteligência e saúde pra continuar esse caminho até aqui.

Resumo

O trabalho a seguir tem três objetivos principais. O primeiro é de conhecer o funcionamento de veículos a combustão de uma forma mais profunda. Esse conhecimento deve englobar toda a parte da injeção eletrônica para possível uso junto com motores elétricos. Sinais de sensores e ciclos de motores podem ser usados para objetivo final.

O segundo objetivo é relacionado ao comportamento eletromagnético da máquina a relutância variável. Será mostrado todas as vantagens, desvantagens e características construtivas.

Por último, será dimensionado três máquinas a relutância variável que une os conhecimentos estudados nestas duas primeiras partes. Este dimensionamento será realizado de forma a ter características nominais com possibilidade de uso do motor elétrico juntamente com o motor a combustão do veículo estudado.

Palavra-chave: Máquina Relutância Variável, Veículo Híbrido, Projeto de Máquinas Elétricas.

Abstract

This work has three main objectives. The first is to know the operation of combustion vehicles in a deeper way. This knowledge should encompass the entire part of electronic injection for possible use together with electric motors. Sensor signals, actuator commands and motor cycles can be used for the final purpose.

The second objective is related to the electromagnetic behavior of the switch reluctance machine. It will be shown all the advantages, disadvantages and constructive characteristics.

Finally, three machines will be dimensioned with variable reluctance that unites the knowledge studied in these first two parts. This dimensioning will be carried out in order to have nominal characteristics with the possibility of using the electric motor together with the combustion engine of the vehicle studied.

Keywords: Switch Reluctance Machine, Hybrid Vehicle, Electrical Machine Design.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Anuário de licenciamento de veículos elétricos [9]	1
Tabela 2 - Parâmetros em comum das máquinas 1,2 e 3.....	17
Tabela 3 - Parâmetros específicos das máquinas 1,2 e 3.....	17
Tabela 4 - Resumo de parâmetros calculados para máquina 1.....	28
Tabela 5 - Resumo de parâmetros calculados para máquina 2.....	28
Tabela 6 - Resumo de parâmetros calculados para máquina 3.....	29

Lista de Figuras

Figura 1 - Crescimento de registros de novos veículos	4
Figura 2 - Composição do cilindro [6]	6
Figura 3 - Fases de rotação do ciclo Otto [8]	7
Figura 4 - Localização de sensor de rotação [6]	8
Figura 5 - Sinal do sensor de rotação [6]	8
Figura 6 - Sinal do sensor de fase [6]	9
Figura 7 - Topologia de uma MRV 6x4 (6 dentes no estator e 4 dentes no rotor) [3]	10
Figura 8 - Localização de sensor óptico para determinar posição angular do rotor [2]	11
Figura 9 - Ilustração de parâmetros a serem calculados neste capítulo [5]	14
Figura 10 - Relação de Potência x Torque x Rotação (cv x m.kgf x rpm) do motor do Fiat Uno 2009. [16]	15
Figura 11 - Densidade de fluxo magnético em MRV com 4 fases. [2]	21
Figura 12 - Densidade do Fluxo Magnético em função da Intensidade do Campo Magnético.	32

Sumário

1.	Introdução ao Trabalho.....	1
1.1	Introdução ao Projeto.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivos Gerais	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
2.	Referencial bibliográfico	4
3.	Injeção Eletrônica	5
3.1	Introdução	5
3.2	Funcionamento básico do motor	5
3.3	Sensores	7
3.3.1	Sensor de rotação de motor	7
3.3.2	Sensor de fases do motor	8
3.4	Conclusão	9
4.	Características da Máquina a Relutância Variável	10
4.1	Introdução	10
4.2	Características mecânicas	10
4.3	Características eletromagnéticas.....	11
4.4	Conclusão	12
5.	Projeto da máquina para uso em veículo híbrido	14
5.1	Introdução	14
5.2	Motor Fiat Uno 2009	15
5.3	Projeto do motor	15
5.3.1	Potência dos motores (P)	16
5.3.2	Número de polos e fases	17
5.3.3	Diâmetro do rotor e comprimento da MRV	17
5.3.4	Ângulo do polo do estator (β_s)	19
5.3.5	Comprimento do entreferro (g).....	19

5.3.6 Altura da culatra do estator (y_s)	20
5.3.7 Diâmetro do estator (D_s)	22
5.3.8 Largura do polo do estator (t_s)	22
5.3.9 Largura do polo do rotor (t_r)	23
5.3.10 Ângulo do polo do rotor (β_r)	24
5.3.11 Altura do polo do rotor (d_r)	25
5.3.12 Altura da culatra do rotor (y_r)	26
5.3.13 Diâmetro do eixo do rotor (D_{eixo})	26
5.3.14 Altura do polo do estator (d_s)	27
5.4 Resumo dos parâmetros	28
O desenho feito das lâminas com todas as dimensões citadas está em anexo ao trabalho. ...	29
5.5 Número de espiras	29
5.6 Conclusão	33
6. Conclusão final	34
7. Referências	35

1. Introdução ao Trabalho

1.1 Introdução ao Projeto

Os estudos recentes voltados ao uso da energia elétrica preocupam-se com as vantagens econômicas e ambientais principalmente. O aumento de produção e rendimento das máquinas são exemplos de vantagens econômicas e a substituição de fontes poluentes por fontes renováveis como energia elétrica em diversos processos de produção em indústrias, torna-se exemplo do cuidado ambiental.[2]

Uma aplicação comercial que mostra a consequência dos estudos mencionados é o aumento de veículos elétricos e híbridos no mundo todo [1]. O crescimento da venda de veículos híbridos é uma realidade no Brasil, como mencionado em [9]. Na Tabela 1 mostra um crescimento contínuo de 2006 que foi licenciado o primeiro carro elétrico ou híbrido no Brasil e o único para o ano, para 19.687 veículos licenciados no ano de 2020. Nos últimos três anos houve um crescimento de 33,5% de 2018 para 2019 e de incríveis 60,2% entre 2019 e 2020

Tabela 1 - Anuário de licenciamento de veículos elétricos [9]

Ano	Quantidade de Automóveis Elétricos Licenciados
2006	1
2007	2
2008	8
2009	21
2010	24
2011	200
2012	117
2013	484
2014	842
2015	843
2016	1.085
2017	3.278
2018	3.965
2019	11.844
2020	19.687

Os motores elétricos, estão se tornando mais potentes e eficientes visando economia financeira seja na substituição de motores elétricos já existentes ou para ocupar mais espaço de motores de fontes não-renováveis (motores à combustão), o que apresenta vantagens ambientais.

No cenário atual de pandemia, a venda de veículos com motores à combustão reduziu

drasticamente segundo a Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis. Comparando os três primeiros meses dos anos de 2021 com 2020, o volume de venda de veículos a diesel caiu 20,1%. Para veículos a gasolina, enfrentaram uma queda nas vendas de 16,9%. [10]

Já o registro de veículos elétricos a bateria, para o mesmo período mencionado acima, aumentou 59,1%, e veículos híbridos (uso de motor a combustão e motor elétrico) aumentou 175%. Isso evidencia que, mesmo com a crise de produção de montadoras por todo o mundo provocada pelo COVID-19 desde o início da pandemia, há uma tendência de crescimento no uso de carros elétricos.[1]

Alinhando a situação atual de investimento em veículos movidos à fonte elétrica ou híbrida, o uso da máquina a relutância variável foi escolhido com base no trabalho de [2] e [3] que mostra claramente as vantagens da MRV para velocidades variáveis. Foi dito em [3] que máquinas a relutância variável foram usadas para geração de energia de matriz eólica devido a um melhor resultado em regime de velocidades variáveis.

As MRV são máquinas conhecidas por terem construção robusta e funcionamento simples comparado a outros tipos de máquinas. Sua composição é basicamente um rotor ferromagnético e um estator com polos salientes onde se localizam as bobinas.[4]

Essas bobinas, localizadas apenas no estator, são usadas para excitação e entrada ou saída da carga (motor ou gerador, respectivamente).

Seu funcionamento tem um rendimento melhor com controle por eletrônica (sensores, microprocessadores e atuadores) [2] [3]. Saber a posição dos dentes do rotor é necessária para excitação de suas bobinas durante a partida como motor e para provocar a parada dos dentes uma posição angular favorável durante o fim do uso, para posterior excitação em uma nova partida. As bobinas da máquina compõem uma única malha usada para dois circuitos, logo o uso desta para cada finalidade em específico é definido por conversores de chaveamento Half Bridge, por exemplo. [2]

O aspecto de melhor desempenho em regime de velocidades variáveis da MRV foi exemplificado nas gerações de energia elétrica por fontes eólicas, pelo fato de que a variável de geração da energia eólica (fluxo de ar) é inconstante. [3]

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Dimensionar uma máquina a relutância variável para aplicação em carro híbrido.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudo do funcionamento e características das Máquinas a Relutância Variável;

- Definir o tipo de topologia construtiva, potência da máquina e dimensões para o uso específico em carro elétrico;
- Elaborar projeto construtivo da máquina para aplicação automobilística;

2. Referencial bibliográfico

. Em [10] foi colocado o crescimento de registros de novos veículos mesmo em período de início de pandemia 2020, em forma de gráfico mostrado na Figura 1. Nas siglas mostradas na Figura 1, é definido muito bem em [11] como PHEV como Plug-in Hybrid Electric Vehicle (do inglês para Veículos Elétricos e Híbridos do tipo Plug-in), e BEV como Battery Electric Vehicle (do inglês para Veículos Elétrico a Bateria).

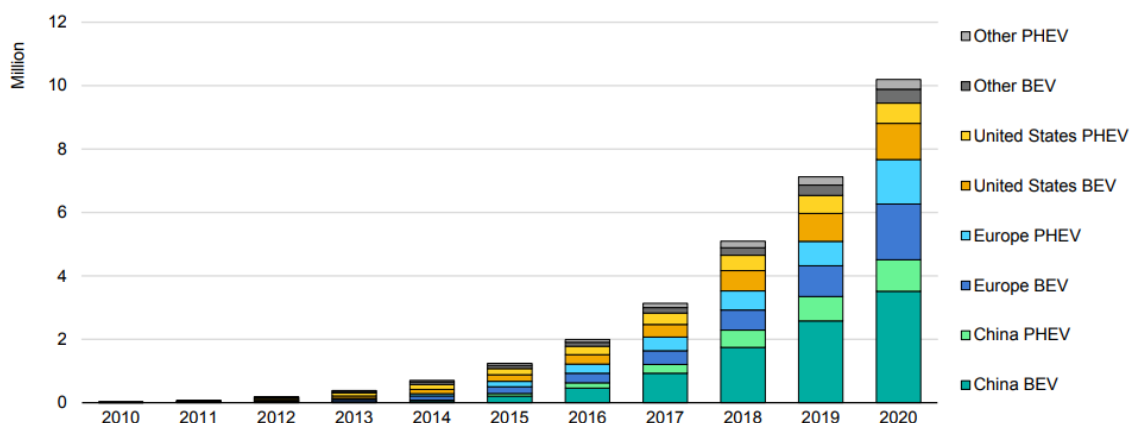


Figura 1 - Crescimento de registros de novos veículos

Ainda em [11] e em [12] discorrem sobre os pontos positivos do crescimento da matriz elétrica para veículos que vão desde maior eficiência, menor impacto ambiental na emissão de poluentes e melhor manutenção, até impactos negativos como exploração e descarte da matéria prima das baterias, o lítio.

Outro motivo da escolha do tipo da máquina é mostrado em [4], o qual diz sobre os aspectos construtivos da máquina a relutância variável como simples e robusta. A construção simples é de extrema importância ao projetar uma máquina que deverá funcionar em espaço físico limitado como é o caso aos arredores do sistema de injeção do carro.

Para o sincronismo do sistema de controle para o motor a combustão à máquina elétrica, foi possível analisar o trabalho de [13] e a fonte de [6] que mostra a importância no entendimento de sensores, atuadores e da própria Unidade de Controle do Motor (UCM). Esses ensinamentos mostram quais e como podem ser usados cada um desses aspectos, conforme será apresentado neste trabalho.

Em [14] foi sugerido um design de máquina a relutância variável para uso em veículo híbrido, exatamente como a proposta deste trabalho. Porém, não foi apresentado um estudo de local de instalação, modo de sincronia entre motores à combustão e elétrico e demais fatores necessários para funcionamento correto da máquina projetada.

3. Injeção Eletrônica

3.1 Introdução

No Brasil, a maior parte dos veículos utilizam sistema injeção eletrônica. Porém existe um aumento considerável no uso de motores elétricos juntamente com os já existentes motores a combustão. [1]

Visando o projeto de uma máquina que trabalhe em conjunto com o motor a combustão, deve-se entender o funcionamento básico da eletrônica automobilística de carros mais populares no Brasil. O capítulo é composto pelo entendimento básico dos sensores que recebem informações necessárias para possível sincronia entre motores à combustão e MRV pela Unidade de Controle do Motor (UCM), a qual é responsável por todo o controle do processo de combustão no motor.

3.2 Funcionamento básico do motor

Para explicar como e porquê será usado a MRV e suas configurações escolhidas, é necessário entender o funcionamento e composição do motor que funciona em ciclo Otto.

No caso do veículo utilizado com base deste trabalho, um Uno Mille Way 2009, seus cilindros com capacidade em litros 1 litro de volume de mistura ar-combustível, ou seja, seu motor é chamado de “1.0” [15]. Na figura 2, mostra que em uma das extremidades de cada cilindro existem duas válvulas, sendo uma de admissão por onde é inserido a mistura ar-combustível e a válvula de escape por onde são expelidos os gases resultantes da combustão. O pistão do motor fica na extremidade oposta às válvulas do cilindro, em cada fase eles podem alcançar o chamado Ponto Máximo Superior (PMS, quando $\alpha=0^\circ$) e Ponto Máximo Inferior (PMI, quando $\alpha=180^\circ$) dos cilindros. Cada um dos pistões está conectado ao virabrequim que são peças mecânicas capazes de conectar o movimento de sobe e desce dos pistões a um eixo único do motor.

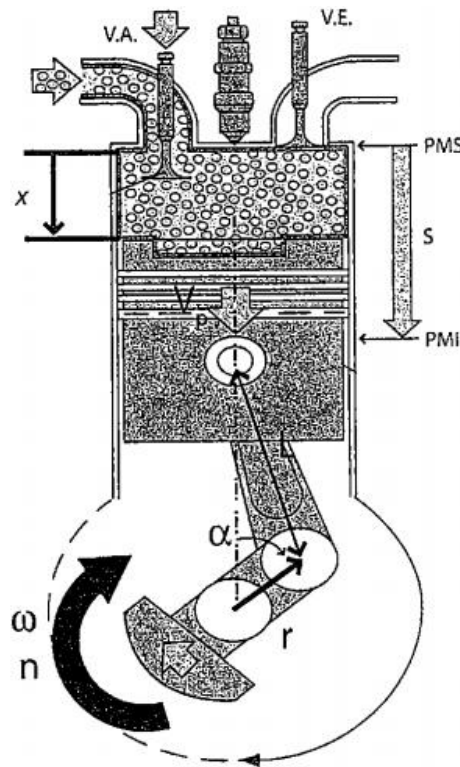


Figura 2 - Composição do cilindro [6]

Deve-se considerar o processo de combustão no ciclo Otto, o qual é o composto por 4 fases:

- Fase de Admissão: o pistão desloca-se do chamado Ponto Máximo Superior (PMS) para o Ponto Máximo Inferior (PMI) do cilindro. Neste movimento, o cilindro é preenchido por uma mistura ar-combustível pela válvula de admissão.
- Fase de Compressão: agora, o pistão se desloca do PMI para o PMS, comprimindo a mistura ar-combustível que está no cilindro. A força de compressão é feita pela fase de expansão de outro(s) cilindros que estão conectados ao mesmo eixo, porém em fases dessincronizadas de forma intencional. Ou seja, enquanto alguns cilindros estão em fase de compressão, outros estão obrigatoriamente em fase de expansão que será apresentada a seguir.
- Fase de Expansão: uma faísca é produzida próxima ao PMS que provoca a combustão da mistura ar-combustível. Essa explosão provoca uma força no pistão do cilindro que é conectado ao virabrequim que, por sua vez, gira o eixo do motor.
- Tempo de escape: a válvula de escape é aberta e os gases resultantes da combustão da mistura ar-combustível é expelida por essa válvula.

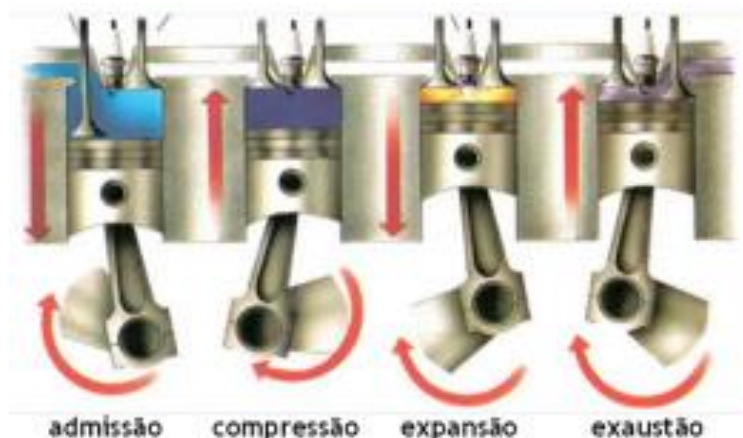


Figura 3 - Fases de rotação do ciclo Otto [8]

3.3 Sensores

O processamento correto dos sinais dos sensores para atuadores agirem conforme processo da injeção eletrônica é de extrema importância na economia de combustível, eficiência na combustão e diminuição na emissão de gases poluentes. O uso dos dados recebidos pelos sensores é feito pela UCM (Unidade de Controle do Motor).

São exemplos de sensores, os que medem posição dos pistões, temperatura e pressão da mistura ar-combustível, posição da válvula borboleta de admissão do ar, entre outros. Esses dados são necessários para controle da mistura estequiométrica ar-combustível, do momento correto de emissão de faísca nas velas para combustão e momento de abertura de válvula de escape, que são controles feitos em função dos dados dos sensores para um melhor desempenho do ciclo de combustão.

No estudo preliminar realizado, foram selecionadas informações de sensores que poderão ser usados para sincronia de motores. São eles: [6]

3.3.1 Sensor de rotação de motor

A unidade de controle do motor usa a velocidade de rotação do motor para diversos processos. Para isso, é posicionado um sensor em um anel dentado que está conectado ao eixo do motor que mede sua velocidade de rotação.

A figura 2 mostra um exemplo de posicionamento do sensor. O sensor tem uma saída de sinal em forma pulsante de tensão em função do tempo como mostrado na Figura 3.

O sensor pode ser usado para monitoramento da velocidade de rotação do eixo do motor e sincronizar com a velocidade de mudança das fases definidas pelo conversor Half-Bridge.

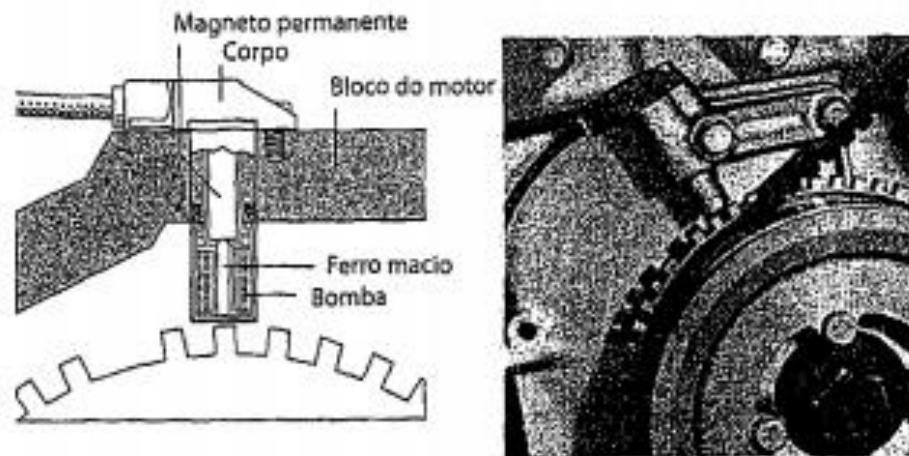


Figura 4 - Localização de sensor de rotação [6]

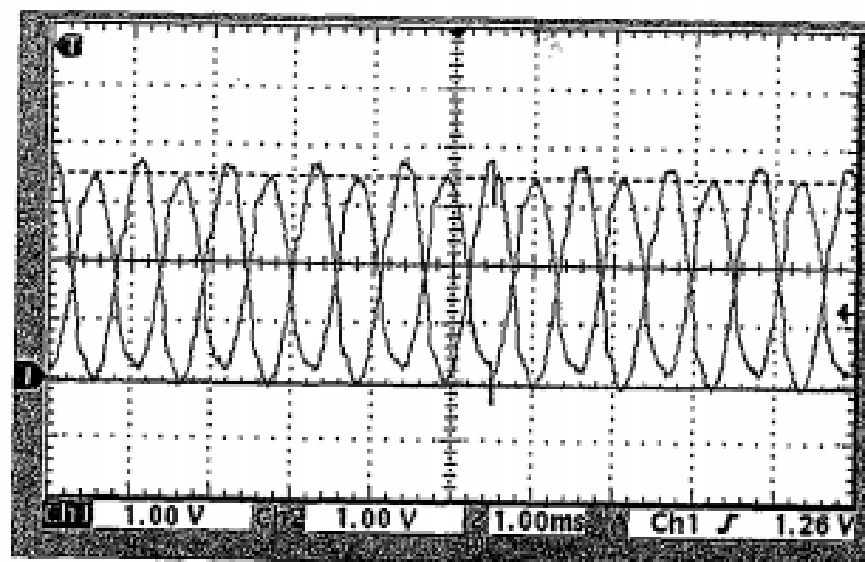


Figura 5 - Sinal do sensor de rotação [6]

3.3.2 Sensor de fases do motor

O sensor de fase é localizado no cabeçote do motor, onde abriga os cilindros, e mede a posição do pistão para cada uma das fases de combustão mencionadas anteriormente. Isso auxilia a UCM para determinar o momento correto de acionamento de atuadores que precisam dessas informações, como o caso da vela de ignição. [6, 7]

A saída do sinal em forma de onda quadrada de tensão em função do tempo.

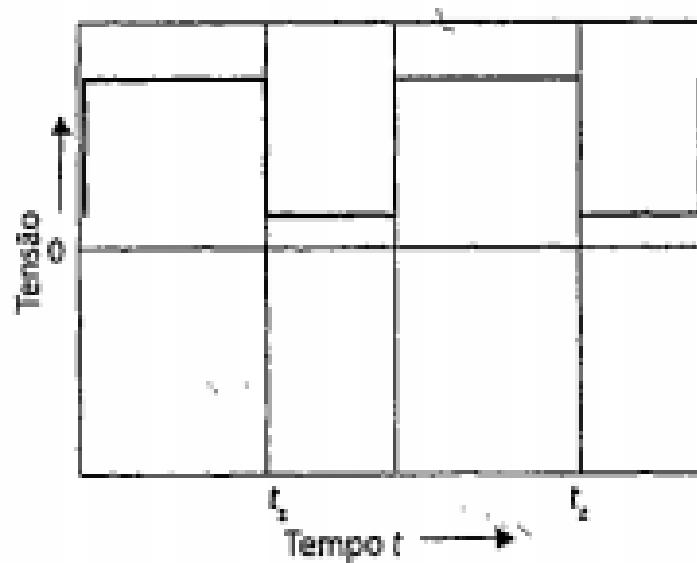


Figura 6 - Sinal do sensor de fase [6]

3.4 Conclusão

Devido a existência de 4 cilindros no motor a combustão de ciclo Otto, conclui-se que é mais conveniente o uso de uma máquina a relutância variável de 4 fases, com topologia 8x6 [5]. O uso dos dados dos sensores estudados, pela UCM será testado posteriormente em outros trabalhos.

Faz-se necessário, então, o estudo dos princípios de funcionamento da máquina a relutância variável. Desta forma, o próximo capítulo se dedica a este entendimento.

O projeto da máquina será realizado no capítulo posterior ao próximo, levando em consideração estudos futuros da eletrônica automobilística que serão adicionados neste capítulo.

4. Características da Máquina a Relutância Variável

4.1 Introdução

O objeto principal deste trabalho é o projeto de uma máquina a relutância variável para uso em um Fiat Uno 2009. Neste capítulo serão mostradas as vantagens da escolha da MRV para atender os objetivos deste trabalho.

Ao final do capítulo, têm-se o objetivo de entender os princípios de funcionamento e equacionamento da máquina para alinhar com os estudos do capítulo anterior sobre a injeção eletrônica:

4.2 Características mecânicas

A máquina de relutância variável possui características de funcionamento peculiares a sua construção. É constituída basicamente do rotor com dentes e estator magnético onde há enrolamentos. A única bobina da máquina está no estator e executa a função da malha de bobina de excitação e malha da bobina de carga em um único circuito. [2, 3]

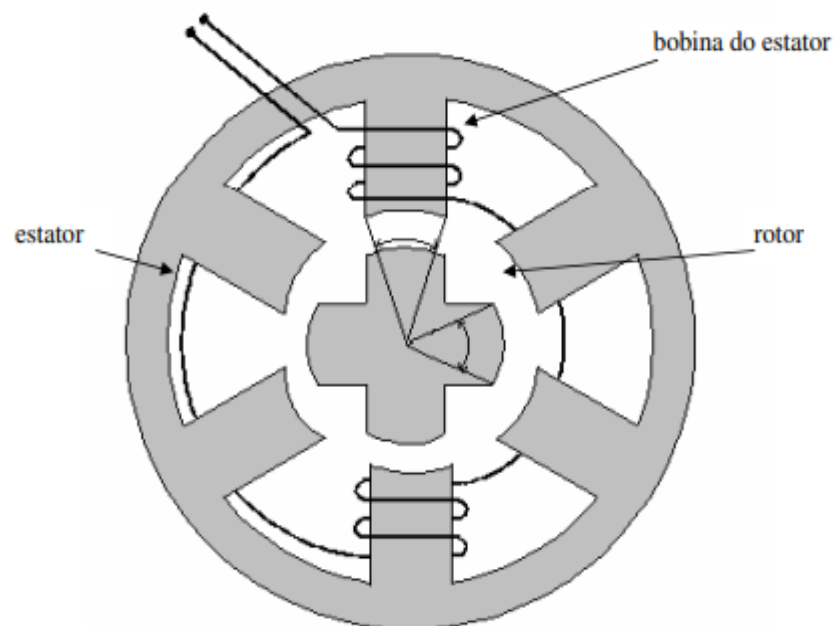


Figura 7 - Topologia de uma MRV 6x4 (6 dentes no estator e 4 dentes no rotor) [3]

Diz-se que a densidade de energia (J/kg) aumenta para este tipo de máquina, devido a diminuição nas suas características construtivas acompanhado do desenvolvimento de controle da máquina por eletrônica. Em outras palavras, há uma diminuição no “volume de máquina” (aço e cobre na parte construtiva), enquanto aumenta-se o “volume de controle” (silício na parte eletrônica) [2, 3].

Estes aspectos construtivos robustos são positivos para a questão ambiental considerando a economia em material usado. Por isso, trata-se de uma máquina mais leve e mais simples em aspectos de manutenção [2, 3, 4], extremamente importante para aplicação em um veículo híbrido.

Na partida da Máquina a Relutância Variável na função de motor, é um exemplo da necessidade de controle eletrônico. É necessário o monitoramento da posição dos dentes do rotor. Isso porque o pulso que será dado na bobina no intuito de alinhar os dentes do rotor com o estator deverá ser na posição angular conveniente para geração de fluxo. Logo, a pesquisa em massa para este tipo de máquina ocorreu com o desenvolvimento das tecnologias em eletrônica para auxílio no funcionamento da máquina. [2, 3]

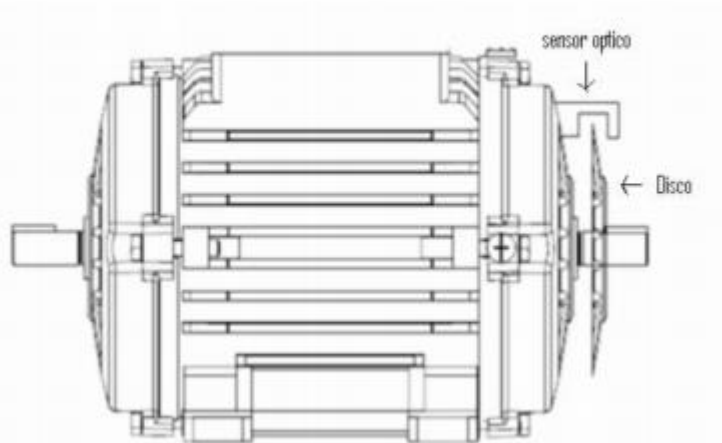


Figura 8 - Localização de sensor óptico para determinar posição angular do rotor [2]

É uma máquina de muito requinte de aplicação específica já que máquinas a relutância são boas para controle de torque de início de partida. O aspecto de melhor desempenho em regime de velocidades variáveis foi exemplificado nas gerações de energia elétrica por fontes eólicas. Isto se dá pela variação na força geradora eólica (fluxo de ar). [3] Esta característica será de grande importância, visto que em veículos híbridos o motor elétrico trabalha mais e melhor em velocidades baixas, variáveis e até na partida do motor a combustão. [16]

4.3 Características eletromagnéticas

O comportamento da corrente depende da relação entre FCEM (Força Contra eletromotriz) e a tensão de excitação aplicada. A tensão nos enrolamentos de uma máquina conversora é dada pela soma da equação a seguir, sendo o segundo termo do segundo membro é a FCEM da máquina:

$$v = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad \text{Equação 4.1}$$

Desmembrando o segundo termo ($\frac{\partial \lambda}{\partial t}$), temos a equação a seguir onde mostra-se a relação entre as grandezas eletromagnéticas da máquina: [2, 3]

$$v = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad \text{Equação 4.2}$$

O primeiro termo (Ri) representa basicamente a queda de tensão nos enrolamentos da máquina, sendo “ R ” a resistência dos enrolamentos e “ i ” a corrente da máquina. O segundo termo ($L \frac{\partial i}{\partial t}$) refere-se à queda de tensão nas propriedades indutivas das espiras da MRV. Já no terceiro termo, pode-se enxergar a indutância própria do enrolamento (∂L) que varia em função da posição angular do rotor ($\partial \theta$) onde a área de fluxo do campo magnético altera devido a variação da posição angular que, por sua vez, estará em função do tempo. O terceiro termo é muito maior que os demais termos da equação, tornando-se dominante principalmente pela alta taxa de variação da indutância. Este terceiro termo trata-se de uma Força Contra eletromotriz (FCEM) da máquina, ou seja, pode-se dizer que a tensão “ v ” é a própria FCEM da máquina. [2, 3]

Já As variações da relutância mencionadas anteriormente causadas pela variação do comprimento do circuito magnético devido à rotação do rotor representada na fórmula a seguir: [2, 3, 4]

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad \text{Equação 4.3}$$

Considerando a indutância sendo diretamente proporcional ao fluxo magnético, o comportamento como máquina a relutância variável é explicado pela lei de Faraday. Ao injetar corrente no circuito, há um aumento no fluxo magnético na bobina que provoca uma atração no polo do estator magnético. Desta forma, haverá um movimento “forçado” de atração entre o estator e o rotor no objetivo de se alinharem. Ou seja, as bobinas são excitadas quando aumenta o fluxo magnético que, por sua vez, é diretamente proporcional ao aumento da indutância mútua nas bobinas. [2, 3, 4]

A funcionalidade exige um alto nível de precisão no momento correto de excitação para o funcionamento correto da máquina conforme aplicação. Para isso, usa-se sensores que indiquem a posição dos dentes do rotor a cada instante.

4.4 Conclusão

Desta forma, são demonstrado as vantagens no uso da Máquina a Relutância Variável para o fim de veículo híbrido e a facilidade no projeto desta devido à sua simplicidade de funcionamento.

No próximo capítulo a máquina será dimensionada de forma a suprir as necessidades de um veículo. As simulações da máquina em seus aspectos eletromagnéticos e o projeto dos conversores usados para acionamento da máquina, serão realizados em outros trabalhos de conclusão de curso.

5. Projeto da máquina para uso em veículo híbrido

5.1 Introdução

Este capítulo dedica-se a aplicar princípios de funcionamento da Máquina a Relutância Variável, desenvolvidos no capítulo anterior, no projeto eletromecânico da máquina que será usada no veículo híbrido.

Será projetada uma máquina na tentativa de alcançar valores de potência, torque e rotação específicos para o funcionamento em conjunto com motor a combustão do Fiat Uno 2009.

As dimensões serão todas conformes ilustrações a seguir: [5]

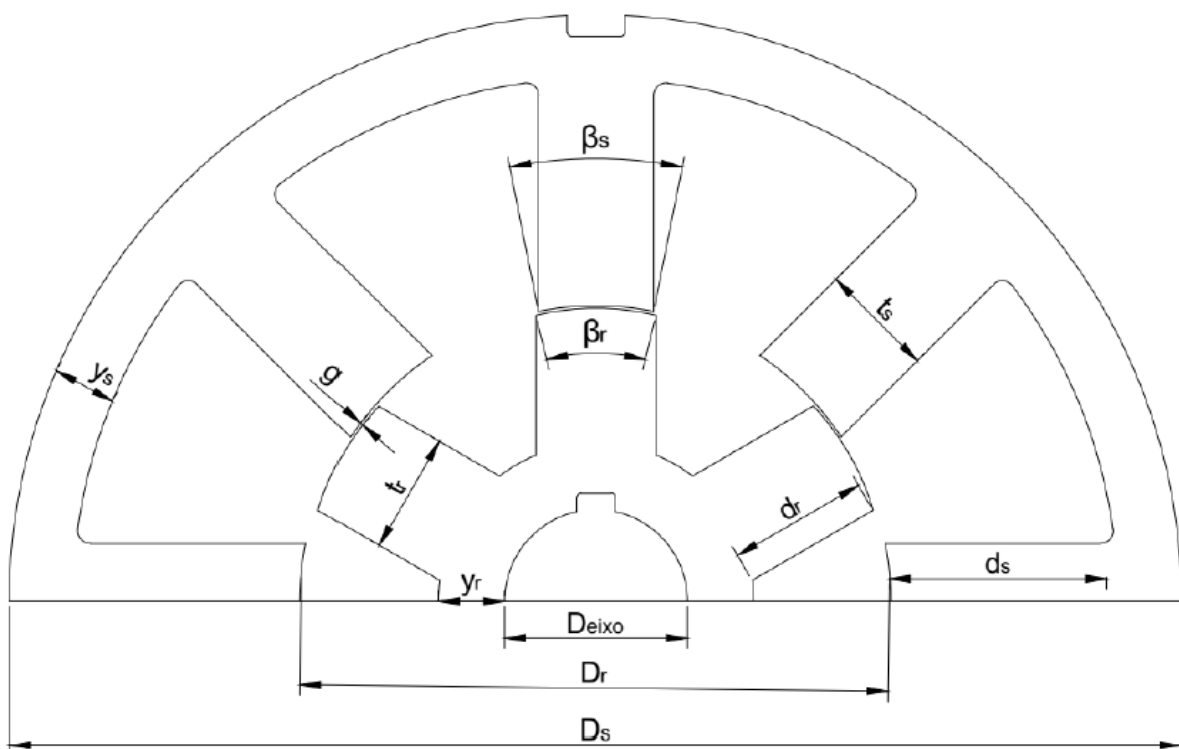


Figura 9 - Ilustração de parâmetros a serem calculados neste capítulo [5]

Sendo:

- D_r – Diâmetro do rotor;
- t_r – Largura do polo do rotor;
- d_r – Altura do polo do rotor;
- y_r – Altura da culatra do rotor;
- β_r – Ângulo do polo do rotor;
- D_s – Diâmetro externo do estator;
- t_s – Largura do polo do estator;
- d_s – Altura do polo do estator;
- y_s – Altura da culatra do estator;
- β_s – Ângulo do polo do estator;
- D_{eixo} – Diâmetro do eixo do motor;

- g – Comprimento do entreferro;
- l – Comprimento da máquina;

5.2 Motor Fiat Uno 2009

Trata-se de um motor “69 cv 1.0 4 cilindros”. O desempenho de potência solicitada x torque solicitado para cada rotação, está representado a seguir: [16]

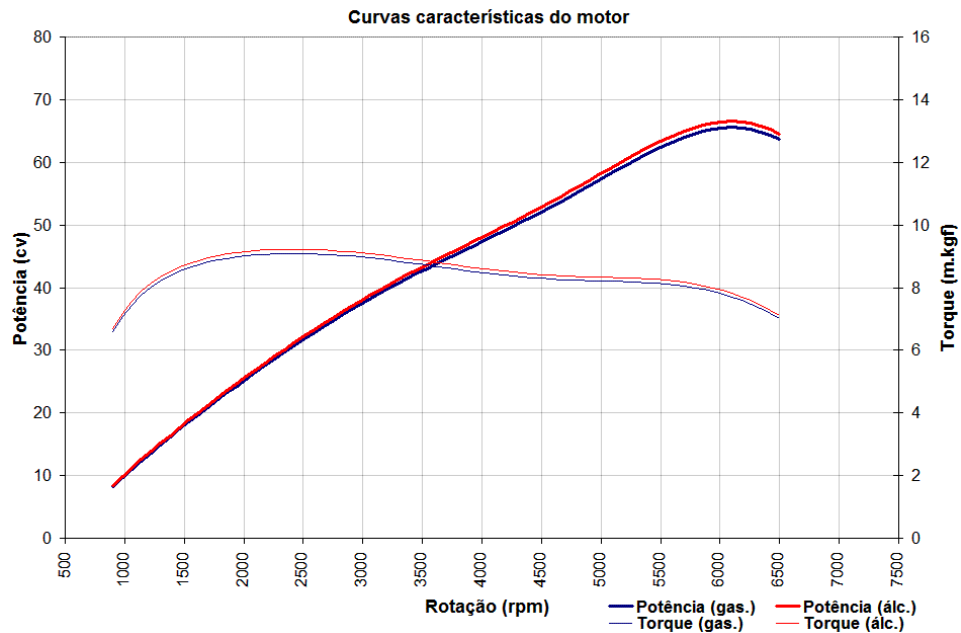


Figura 10 - Relação de Potência x Torque x Rotação (cv x m.kgf x rpm) do motor do Fiat Uno 2009. [16]

5.3 Projeto do motor

Todo o roteiro deste capítulo foi baseado em [2] e [5] onde é executado um projeto do mesmo tipo de MRV.

Para determinar valores nominais da máquina que será projetada foi considerado alguns pontos:

- Motores elétricos usados em veículos híbridos têm eficiência maior em baixas velocidades produzindo alto torque [16]. Comercialmente, os motores elétricos atuam no momento de saída da inércia do veículo. Logo, foi considerada a região de 1000 rpm até 3000 rpm como sendo para o gráfico de torque (linha mais fina da Figura 10);
- Pode-se observar que em baixas velocidades até 3000 rpm, o torque médio do gráfico é de 8 m.kgf.

Para efeito de cálculo, é necessário transformar esses valores em grandezas oferecidas no gráfico para grandezas no padrão S.I. (Sistema Internacional de Unidades).

Sendo torque considerado em N.m, potência em Watts e rotação em radianos por segundo. Para os dados fornecidos no gráfico de desempenho do carro considerado, é necessária a transformação das unidades feita conforme as relações de unidades a seguir:

$$1 \text{ kgf.m} = 9,8 \text{ N.m} \quad \text{Equação 5.1}$$

$$1 \text{ rpm} = \left(\frac{2\pi}{60}\right) \text{ rad/s} \quad \text{Equação 5.2}$$

$$1 \text{ cv} = 736 \text{ Watts} \quad \text{Equação 5.3}$$

Logo, tem-se que 3000 rpm é equivalente à 314,1592 rad/segundos ($Velocidade_N$), e 8 m.kgf é equivalente a 78,4 N.m. Será considerado três torques para o projeto da máquina, ou seja, decidiu-se demonstrar três resultados. Esses três resultados servirão para uma melhor análise das grandezas eletromecânicas e a possibilidade de um estudo mais aprimorado posteriormente. A primeira, sendo a de maior torque, terá 50% do torque nominal da máquina a combustão e terá um torque nominal de 40 N.m ($Torque_1$), a segunda com 25% terá torque nominal de 20 N.m ($Torque_2$), e a terceira com 12,5% terá torque de 10 N.m ($Torque_3$). Este projeto leva em consideração o funcionamento da injeção eletrônica do Fiat Uno 2009 e características da máquina em si.

5.3.1 Potência dos motores (P)

O cálculo da potência em Watts de um motor usa a fórmula:

$$Potencia = Torque * Velocidade_n \quad \text{Equação 5.4}$$

Logo, a potência da máquina 1 com 40 N.m é definindo a seguir:

$$Potência_1 = Torque_1 * Velocidade_n$$

$$Potência_1 = 40 * 314,1592$$

$$Potência_1 = 12566,37061 \text{ W} \quad \text{em Watts}$$

Já para a máquina 2 com 20 N.m, tem-se:

$$Potência_2 = Torque_2 * Velocidade_N$$

$$Potência_2 = 20 * 314,1592$$

$$Potência_2 = 6283,1853 \text{ W} \quad \text{em Watts}$$

Assim temos para a máquina 3 de torque nominal 10 N.m:

$$Potência_3 = Torque_3 * VelocidadeN$$

$$Potência_3 = 10 * 314,1592$$

$$Potência_3 = 3141,5926 \text{ W} \quad \text{em Watts}$$

Para transformar a unidade da potência de Watts para cavalos, usa-se a equação 5.3. Para cada uma das potências em Watts, têm-se as potências em cavalos a seguir:

$$Potência_1 = 17,0855 \text{ cv} \quad \text{em cv}$$

$$Potência_2 = 8,5427 \text{ cv} \quad \text{em cv}$$

$$Potência_3 = 4,2713 \text{ cv} \quad \text{em cv}$$

5.3.2 Número de polos e fases

Conforme estudado no capítulo 3, em específico ao subitem 3.2 (Princípios básicos do funcionamento do motor), vemos que o motor a combustão que funciona com base no ciclo Otto têm basicamente quatro estágios de funcionamento. A escolha mais condizente para os motores serem usados em conjunto em um sistema híbrido, seria uma MRV de quatro fases.

Com isso, foi escolhido as configurações a seguir que serão em comum para os três motores: [2]:

Tabela 2 - Parâmetros em comum das máquinas 1,2 e 3

Parâmetro	Valor	Unidade
Número de polos do estator (N_{ps})	8	Polos
Número de polos do rotor (N_{pr})	6	Polos
Número de fases	4	Fases
Velocidade nominal (ω)	314,16	Rad/s

Tabela 3 - Parâmetros específicos das máquinas 1,2 e 3

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência da máquina 1 (P_1)	12566,37	Watts
Potência da máquina 2 (P_2)	6283,18	Watts
Potência da máquina 3 (P_3)	3141,59	Watts

5.3.3 Diâmetro do rotor e comprimento da MRV

Em [2] relaciona-se os parâmetros mecânicos da máquina com os eletromagnéticos de tal forma:

$$F = A \cdot B \cdot \pi \cdot D_r \cdot l \quad \text{Equação 5.5}$$

Multiplicando a equação da força eletromagnética pelo raio, obtêm-se o conjugado © desta máquina. Logo:

$$C = \frac{1}{2} \cdot A \cdot B \cdot \pi \cdot D_r^2 \cdot l \quad \text{Equação 5.6}$$

Conforme escrito em [2] e [5], demonstra-se que o termo de carregamento elétrico (A) e o termo de carregamento magnético (B), podem ser definidos como uma constante para diversos tipos de máquinas. Então, a constante “k” que irá compor terá a equação demonstrará a seguir, onde TRV indica o conjugado por volume do motor (quanto maior o TRV, maior seu conjugado para um mesmo volume de motor):

$$\frac{1}{2} \cdot A \cdot B \cdot \pi \cdot D_r^2 \cdot l = C = \frac{TRV \cdot \pi \cdot l}{4} \quad \text{Equação 5.7}$$

Outra consideração a se fazer é a relação k_1 , que indica a razão entre o diâmetro do rotor e o comprimento da máquina.

$$k_1 = \frac{l}{D_r} \quad \text{Equação 5.8}$$

Substituindo o valor das equações 5.7 e 5.8 na equação 5.6, e posteriormente isolando o termo de diâmetro do rotor (D_r), têm-se:

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P}{TRV \cdot \pi \cdot k_1 \cdot \omega}} \quad \text{Equação 5.9}$$

Usando valores definidos em [5] como $TRV = 16 \text{ k.N.m/m}^3$ para máquinas com aplicação próximo a máquinas industriais, e $k_1 = 1,6355$ que indica um Diâmetro de rotor 60% menor que o comprimento da máquina. Logo, o valor do Diâmetro do rotor da máquina 1 é dado por:

$$D_{r1} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 12566,37}{16000 \cdot \pi \cdot 1,6355 \cdot 314,16}}$$

$$D_{r1} = 0,12 \quad \text{em metro}$$

A seguir, o diâmetro do rotor da máquina 2:

$$D_{r2} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 6283,18}{16000 \cdot \pi \cdot 1,6355 \cdot 314,16}}$$

$$D_{r2} = 0,10 \quad \text{em metro}$$

Também para a máquina 3, observamos que:

$$D_{r3} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 3141,59}{16000 \cdot \pi \cdot 1,6355 \cdot 314,16}}$$

$$D_{r3} = 0,08 \quad \text{em metro}$$

Substituindo os valores dos diâmetros na equação 5.8, pôde-se descobrir o comprimento total da máquina (l). Têm-se para a máquina 1:

$$l_1 = 0,12 \cdot 1,6355$$

$$l_1 = 0,20 \quad \text{em metro}$$

Também para a máquina 2:

$$l_2 = 0,10 \cdot 1,6355$$

$$l_2 = 0,16 \quad \text{em metro}$$

E finalmente para a máquina 3:

$$l_3 = 0,08 \cdot 1,6355$$

$$l_3 = 0,13 \quad \text{em metro}$$

5.3.4 Ângulo do polo do estator (β_s)

Segundo o roteiro apresentado em [2] e [5], têm-se que o ângulo do polo do estator é dado por 180° dividido pelo número de polos. Considerando que todas as três máquinas possuem o mesmo número de fases, têm-se que o ângulo do polo do estator para essas é:

$$\beta_s = \frac{180^\circ}{Np_s} \quad \text{Equação 5.10}$$

$$\beta_s = \frac{180^\circ}{8}$$

$$\beta_s = 22,5^\circ \quad \text{em graus}$$

5.3.5 Comprimento do entreferro (g)

O cálculo do comprimento do entreferro deve levar em consideração a precisão de corte

das lâminas aço-silício de grão não orientado assim como feito em [2] e [5], e que quanto maior o comprimento do entreferro, maior a relutância da máquina, conforme equação a seguir: [4]

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 \cdot A_g}$$

Sendo “ μ_0 ” a permeabilidade do ar constante e “ A_g ” a área do entreferro, deseja-se obter a menor relutância possível. Logo, o valor do entreferro pode ser calculado como 0,4% do diâmetro do rotor (D_r), conforme a seguir:

$$g = 0,004 \cdot D_r \quad \text{Equação 5.11}$$

Visto isso, definimos a seguir o entreferro para a máquina 1 com torque nominal de 40 N.m:

$$g_1 = 0,004 \cdot D_{r1}$$

$$g_1 = 0,004 \cdot 0,12$$

$$g_1 = 0,0005 \quad \text{em metro}$$

Da mesma forma, para máquina 2 a seguir que apresenta torque nominal de 20 N.m:

$$g_2 = 0,004 \cdot D_{r2}$$

$$g_2 = 0,004 \cdot 0,10$$

$$g_2 = 0,0004 \quad \text{em metro}$$

Além disso, o entreferro da máquina 3 com torque nominal de 10 N.m é definido a seguir:

$$g_3 = 0,004 \cdot D_{r3}$$

$$g_3 = 0,004 \cdot 0,08$$

$$g_3 = 0,0003 \quad \text{em metro}$$

5.3.6 Altura da culatra do estator (y_s)

A altura da culatra deve ser dimensionada de forma a respeitar a regra colocada em [2] e [5] que evita um maior fluxo magnético no rotor que no estator. A simulação realizada em [5] demonstra uma situação ideal onde o fluxo no rotor é evidentemente menor que o fluxo magnético no estator.

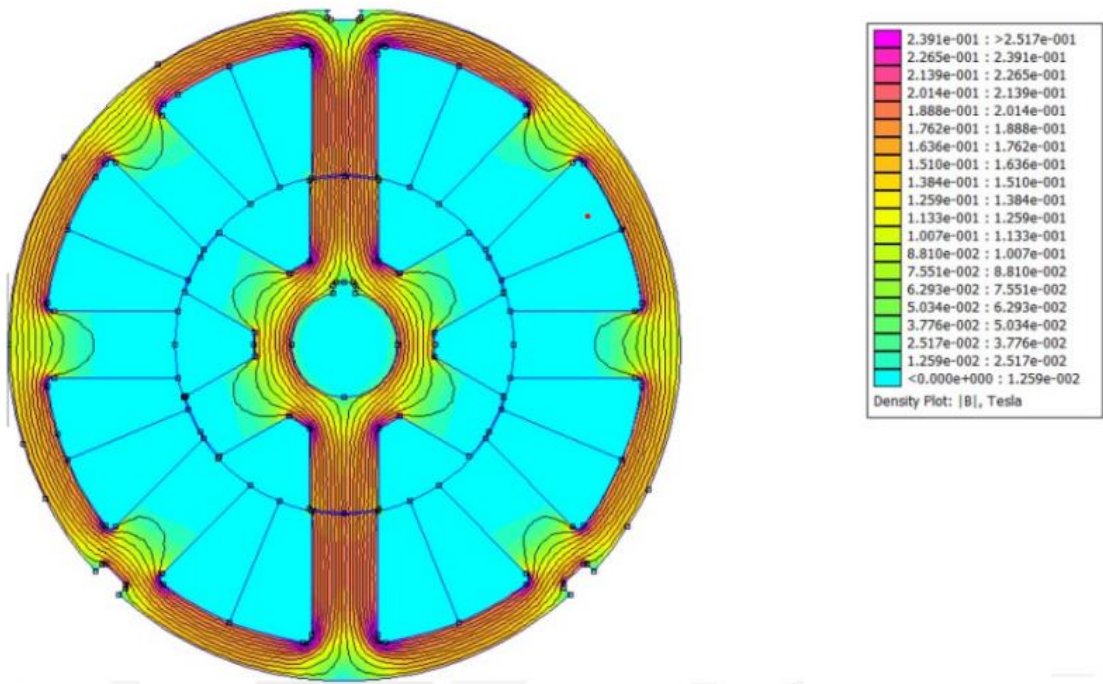


Figura 11 - Densidade de fluxo magnético em MRV com 4 fases. [2]

Pode ser calculado essa altura conforme a seguir [2] e [5]:

$$y_s = \frac{D_r + 2 \cdot g}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad \text{Equação 5.12}$$

Segue cálculo para máquina 1:

$$y_{s1} = \frac{D_{r1} + 2 \cdot g}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\beta_s}{2}\right)$$

$$y_{s1} = \frac{0,12 + 2 \cdot 0,0005}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{22,5^\circ}{2}\right)$$

$$y_{s1} = 0,012 \quad \text{em metro}$$

Tem-se para a máquina 2 que:

$$y_{s2} = \frac{D_{r2} + 2 \cdot g}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\beta_s}{2}\right)$$

$$y_{s2} = \frac{0,10 + 2 \cdot 0,0004}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{22,5^\circ}{2}\right)$$

$$y_{s2} = 0,0097 \quad \text{em metro}$$

E finalmente para a máquina 3:

$$y_{s3} = \frac{D_{r3} + 2 \cdot g}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\beta_s}{2}\right)$$

$$y_{s3} = \frac{0,08 + 2 \cdot 0,0003}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{22,5^\circ}{2}\right)$$

$$y_{s3} = 0,0077 \quad \text{em metro}$$

5.3.7 Diâmetro do estator (D_s)

Para o cálculo do diâmetro do estator, segundo [2], deve-se considerar que o diâmetro do estator (D_s) equivale de 40% a 70% o diâmetro do rotor (D_r). Para [5] foi considerado 50% esta relação de diâmetros que será usado também neste dimensionamento. Logo, têm-se os diâmetros dos rotores para a equação 5.13 a seguir:

$$\frac{D_r}{D_s} = 0,5 \quad \text{Equação 5.13}$$

Assim, temos para a máquina 1:

$$D_{s1} = \frac{D_{r1}}{0,5}$$

$$D_{s1} = \frac{0,12}{0,5}$$

$$D_{s1} = 0,24 \quad \text{em metro}$$

Da mesma forma para a máquina 2:

$$D_{s2} = \frac{D_{r2}}{0,5}$$

$$D_{s2} = \frac{0,10}{0,5}$$

$$D_{s2} = 0,20 \quad \text{em metro}$$

Também para a máquina 3:

$$D_{s3} = \frac{D_{r3}}{0,5}$$

$$D_{s3} = \frac{0,08}{0,5}$$

$$D_{s3} = 0,16 \quad \text{em metro}$$

5.3.8 Largura do polo do estator (t_s)

No cálculo do diâmetro do rotor, usa-se a relação de o valor da altura da culatra do rotor (y_s) equivale a 50% do valor da largura do polo do estator (t_s). Logo pela equação 5.14 a seguir, têm-se:

$$t_s = \frac{y_s}{0,5} \quad \text{Equação 5.14}$$

Tem-se que a largura do polo do estator da máquina 1 de torque 40 N.m é:

$$t_{s1} = \frac{y_{s1}}{0,5}$$

$$t_{s1} = \frac{0,0122}{0,5}$$

$$t_{s1} = 0,0245 \quad \text{em metro}$$

Já a largura do polo do estator da máquina 2 de 20 N.m tem dimensão a seguir:

$$t_{s2} = \frac{y_{s2}}{0,5}$$

$$t_{s2} = \frac{0,0097}{0,5}$$

$$t_{s2} = 0,0194 \quad \text{em metro}$$

E por último, o polo do estator da máquina 3 com 10 N.m é dado por:

$$t_{s3} = \frac{y_{s3}}{0,5}$$

$$t_{s3} = \frac{0,007}{0,5}$$

$$t_{s3} = 0,0156 \quad \text{em metro}$$

5.3.9 Largura do polo do rotor (t_r)

Segundo o roteiro seguido em [2] e [5], pode-se obter o valor da largura do polo do rotor pela equação 5.15 a seguir. Esta fórmula considera que a largura do polo do rotor deve ser ligeiramente maior que o polo do estator. Isso aumenta o tempo de fluxo magnético máximo quando o rotor está em movimento de rotação e alinha-se ao polo do estator:

$$t_r = t_s + 2 \cdot g \quad \text{Equação 5.15}$$

Para a máquina 1:

$$t_{r1} = t_{s1} + 2 \cdot g$$

$$t_{r1} = 0,0245 + 2 \cdot 0,005$$

$$t_{r1} = 0,0255 \quad \text{em metro}$$

Calcula-se que para a máquina 2:

$$t_{r2} = t_{s1} + 2 \cdot g$$

$$t_{r2} = 0,0195 + 2 \cdot 0,005$$

$$t_{r2} = 0,0203 \quad \text{em metro}$$

Assim, para a máquina 3:

$$t_{r3} = t_{s3} + 2 \cdot g$$

$$t_{r3} = 0,0155 + 2 \cdot 0,005$$

$$t_{r3} = 0,0161 \quad \text{em metro}$$

5.3.10 Ângulo do polo do rotor (β_r)

Segundo o que determina no trabalho [5], tem-se a definição do ângulo do polo do rotor com sendo o dobro do arco seno da razão entre largura do polo do rotor (t_r) pelo diâmetro total do rotor (D_r), como fórmula a seguir:

$$B_r = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{t_r}{D_r}\right) \quad \text{Equação 5.16}$$

Conforme demonstrado anteriormente, tem-se para a máquina 1 que:

$$B_{r1} = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{t_{r1}}{D_{r1}}\right)$$

$$B_{r1} = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{0,0255}{0,12}\right)$$

$$B_{r1} = 23,62^\circ \quad \text{em graus}$$

Para a máquina 2, fica definido que:

$$B_{r2} = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{t_{r2}}{D_{r2}}\right)$$

$$B_{r2} = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{0,0203}{0,10}\right)$$

$$B_{r2} = 23,62^\circ \quad \text{em graus}$$

Já para a máquina 3, segue:

$$B_{r3} = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{t_{r3}}{D_{r3}}\right)$$

$$B_{r3} = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{0,0161}{0,08}\right)$$

$$B_{r3} = 23,62^\circ \quad \text{em graus}$$

5.3.11 Altura do polo do rotor (d_r)

Em [5] explica-se critérios para o cálculo da altura do polo do rotor devem considerar a maior variação de indutância no estator. O valor desta altura pode ser calculado como metade do valor da largura do polo do estator (t_s).

$$d_r = \frac{t_s}{2} \quad \text{Equação 5.17}$$

Pôde-se definir para a máquina 1 que:

$$d_{r1} = \frac{t_{s1}}{2}$$

$$d_{r1} = \frac{0,02455}{2}$$

$$d_{r1} = 0,01228 \quad \text{em metro}$$

Para a máquina 2, tem-se que:

$$d_{r2} = \frac{t_{s2}}{2}$$

$$d_{r2} = \frac{0,01948}{2}$$

$$d_{r2} = 0,0097 \quad \text{em metro}$$

Finalmente para a máquina 3, tem-se que:

$$d_{r3} = \frac{t_{s3}}{2}$$

$$d_{r3} = \frac{0,0155}{2}$$

$$d_{r3} = 0,0077 \quad \text{em metro}$$

5.3.12 Altura da culatra do rotor (y_r)

Neste cálculo de altura da culatra do rotor (y_r), respeita-se a mesma regra para o cálculo da altura da culatra do estator (y_s), onde deve-se evitar uma culatra que apresente um fluxo magnético com densidade alta. Desta forma, como visto em [5], deve-se obter um valor mínimo da altura da culatra do rotor como sendo metade da altura do polo do rotor (t_r) com acréscimo de 20% deste valor mínimo, conforme a seguir:

$$y_r = 1,2 \cdot \frac{t_r}{2} \quad \text{Equação 5.18}$$

Desta forma, observa-se que para a máquina 1, tem-se:

$$y_{r1} = 1,2 \cdot \frac{t_{r1}}{2}$$

$$y_{r1} = 1,2 \cdot \frac{0,02555}{2}$$

$$y_{r1} = 0,01533 \quad \text{em metro}$$

Logo, para a máquina 2:

$$y_{r2} = 1,2 \cdot \frac{t_{r2}}{2}$$

$$y_{r2} = 1,2 \cdot \frac{0,0203}{3}$$

$$y_{r2} = 0,01217 \quad \text{em metro}$$

E finalmente, para a máquina 3:

$$y_{r3} = 1,2 \cdot \frac{t_{r3}}{2}$$

$$y_{r3} = 1,2 \cdot \frac{0,0161}{3}$$

$$y_{r3} = 0,0096 \quad \text{em metro}$$

5.3.13 Diâmetro do eixo do rotor (D_{eixo})

Para o cálculo do diâmetro do eixo do rotor, pode ser usado a equação a seguir:

$$D_{eixo} = D_r - 2 \cdot (d_r + y_r) \quad \text{Equação 5.19}$$

Desta forma, o diâmetro do eixo da máquina 1 é dado por:

$$D_{eixo1} = D_{r1} - 2 \cdot (d_{r1} + y_{r1})$$

$$D_{eixo1} = 0,12 - 2 \cdot (0,0123 + 0,0153)$$

$$D_{eixo1} = 0,0696 \quad \text{em metro}$$

Com o mesmo raciocínio, tem-se para a máquina 2:

$$D_{eixo2} = D_{r2} - 2 \cdot (d_{r2} + y_{r2})$$

$$D_{eixo2} = 0,10 - 2 \cdot (0,0097 + 0,0122)$$

$$D_{eixo2} = 0,0553 \quad \text{em metro}$$

E por último, para a máquina 3:

$$D_{eixo3} = D_{r3} - 2 \cdot (d_{r3} + y_{r3})$$

$$D_{eixo3} = 0,08 - 2 \cdot (0,0077 + 0,0096)$$

$$D_{eixo3} = 0,0438 \quad \text{em metro}$$

5.3.14 Altura do polo do estator (d_s)

Para o cálculo da altura do polo do estator, definiu-se em [5], de maneira lógica, que pode ser calculado conforme seguinte equação:

$$d_s = \frac{(D_s - D_r - 2 \cdot (g + y_s))}{2} \quad \text{Equação 5.20}$$

Usando a equação para a máquina 1, tem-se:

$$d_{s1} = \frac{(D_{s1} - D_{r1} - 2 \cdot (g_1 + y_{s1}))}{2}$$

$$d_{s1} = \frac{(0,25 - 0,12 - 2 \cdot (0,0005 + 0,0123))}{2}$$

$$d_{s1} = 0,0496 \quad \text{em metro}$$

Já para a máquina 2:

$$d_{s2} = \frac{(D_{s2} - D_{r2} - 2 \cdot (g_2 + y_{s2}))}{2}$$

$$d_{s2} = \frac{(0,20 - 0,10 - 2 \cdot (0,0004 + 0,0097))}{2}$$

$$d_{s2} = 0,0394 \quad \text{em metro}$$

Desta forma, para a máquina 3 a seguir:

$$d_{s3} = \frac{(D_{s3} - D_{r3} - 2 \cdot (g_3 + y_{s3}))}{2}$$

$$d_{s3} = \frac{(0,16 - 0,08 - 2 \cdot (0,0003 + 0,0077))}{2}$$

$$d_{s3} = 0,0312 \quad \text{em metro}$$

5.4 Resumo dos parâmetros

Segue tabelas com resumo de parâmetros calculados anteriormente para as três máquinas:

Tabela 4 - Resumo de parâmetros calculados para máquina 1.

Símbolo	Parâmetro	Valor utilizado	Unidade
	Torque nominal	40	N.m
P_1	Potência de saída	12566,3706	Watts
N_{ps}	Número de polos do estator	8	Polos
N_{pr}	Número de polos do rotor	6	Polos
	Número de fases	4	Fases
ω	Velocidade nominal	314,16	Rad/s
D_{r1}	Diâmetro do rotor	0,12	Metro
l_1	Comprimento total	0,20	Metro
β_s	Ângulo do polo do estator	22,5	Graus
g_1	Comprimento do entreferro	0,0005	Metro
y_{s1}	Altura da culatra do estator	0,0012	Metro
D_{s1}	Diâmetro do estator	0,24	Metro
t_{s1}	Largura do polo do estator	0,0245	Metro
t_{r1}	Largura do polo do rotor	0,0255	Metro
β_r	Ângulo do polo do rotor	23,62	Graus
d_{r1}	Altura do polo do rotor	0,01228	Metro
y_{r1}	Altura da culatra do rotor	0,01533	Metro
D_{eixo1}	Diâmetro do eixo do rotor	0,0696	Metro
d_{s1}	Altura do polo do estator	0,0496	Metro

Tabela 5 - Resumo de parâmetros calculados para máquina 2.

Símbolo	Parâmetro	Valor utilizado	Unidade
	Torque nominal	20	N.m
P_2	Potência de saída	6283,1853	Watts
N_{ps}	Número de polos do estator	8	Polos
N_{pr}	Número de polos do rotor	6	Polos
	Número de fases	4	Fases
ω	Velocidade nominal	314,16	Rad/s
D_{r2}	Diâmetro do rotor	0,10	Metro

l_2	Comprimento total	0,16	Metro
β_s	Ângulo do polo do estator	22,5	Graus
g_2	Comprimento do entreferro	0,0004	Metro
y_{s2}	Altura da culatra do estator	0,0097	Metro
D_{s2}	Diâmetro do estator	0,20	Metro
t_{s2}	Largura do polo do estator	0,0194	Metro
t_{r2}	Largura do polo do rotor	0,0203	Metro
β_r	Ângulo do polo do rotor	23,62	Graus
d_{r2}	Altura do polo do rotor	0,0097	Metro
y_{r2}	Altura da culatra do rotor	0,01217	Metro
D_{eixo2}	Diâmetro do eixo do rotor	0,0553	Metro
d_{s2}	Altura do polo do estator	0,0394	Metro

Tabela 6 - Resumo de parâmetros calculados para máquina 3

Símbolo	Parâmetro	Valor utilizado	Unidade
	Torque nominal	10	N.m
P_3	Potência de saída	3141,5926	Watts
N_{ps}	Número de polos do estator	8	Polos
N_{pr}	Número de polos do rotor	6	Polos
	Número de fases	4	Fases
ω	Velocidade nominal	314,16	Rad/s
D_{r3}	Diâmetro do rotor	0,08	Metro
l_3	Comprimento total	0,13	Metro
β_s	Ângulo do polo do estator	22,5	Graus
g_3	Comprimento do entreferro	0,0003	Metro
y_{s3}	Altura da culatra do estator	0,0077	Metro
D_{s3}	Diâmetro do estator	0,16	Metro
t_{s3}	Largura do polo do estator	0,0156	Metro
t_{r2}	Largura do polo do rotor	0,0161	Metro
β_r	Ângulo do polo do rotor	23,62	Graus
d_{r3}	Altura do polo do rotor	0,0077	Metro
y_{r3}	Altura da culatra do rotor	0,0096	Metro
D_{eixo3}	Diâmetro do eixo do rotor	0,0438	Metro
d_{s3}	Altura do polo do estator	0,0312	Metro

O desenho feito das lâminas com todas as dimensões citadas está em anexo ao trabalho.

5.5 Número de espiras

Para o cálculo do número de espiras que enrolam os dentes das lâminas do estator, deve-se saber primeiramente a intensidade do campo magnético no entreferro (H_{ent}) e a corrente (I_e) que a máquina solicitará em sua potência máxima de saída (P_s). A seguir, na equação X.X, a equação que mostra o cálculo do número de espiras:

$$N_e = \frac{H_{ent} \cdot 2 \cdot g}{I_e} \quad \text{Equação 5.21}$$

Seguindo o roteiro apresentado em [2] e [5], deve-se calcular primeiramente a potência de entrada (P_e) máquinas, considerando um rendimento médio de 70%. As potências de saída são exatamente as potências nominais da máquina 1 (40 N.m), máquina 2 (20 N.m) e máquina 3 (10 N.m).

$$P_e = \frac{P_s}{\eta} \quad \text{Equação 5.22}$$

Então para a máquina 1, tem-se:

$$P_{e1} = \frac{P_{s1}}{\eta}$$

$$P_{e1} = \frac{12566,37}{0,7}$$

$$P_{e1} = 17951,96 \quad \text{em Watts}$$

Da mesma forma, para a máquina 2:

$$P_{e2} = \frac{P_{s2}}{\eta}$$

$$P_{e2} = \frac{6283,1853}{0,7}$$

$$P_{e2} = 8975,98 \quad \text{em Watts}$$

E finalmente, para a máquina 3:

$$P_{e3} = \frac{P_{s3}}{\eta}$$

$$P_{e3} = \frac{3141,5926}{0,7}$$

$$P_{e3} = 4487,99 \quad \text{em Watts}$$

O acionamento da MRV deste trabalho, assim como em [2] e [5], utiliza de um conversor eletrônico. Este equipamento será desenvolvido em outro trabalho de conclusão de curso. Já no caso da aplicação para carro híbrido, a tensão média de entrada é de 350 Volts [17]. O valor alto de tensão se explica na tentativa de diminuir a área circular dos fios que envolvem os dentes do estator da máquina.

Considerando a Lei de Ohm e que $V_e = 350 \text{ V}$, tem-se que:

$$I_e = \frac{P_e}{V_e} \quad \text{Equação 5.23}$$

Logo, para a máquina 1:

$$I_{e1} = \frac{P_{e1}}{V_e}$$

$$I_{e1} = \frac{17951,96}{350}$$

$$I_{e1} = 51,29 \text{ A}$$

Também para a máquina 2:

$$I_{e2} = \frac{P_{e2}}{V_e}$$

$$I_{e2} = \frac{8975,98}{350}$$

$$I_{e2} = 25,65 \text{ A}$$

E finalmente para a máquina 3:

$$I_{e3} = \frac{P_{e3}}{V_e}$$

$$I_{e3} = \frac{4487,99}{350}$$

$$I_{e3} = 12,82 \text{ A}$$

Na equação 5.24 a seguir, representa-se a forma de cálculo da força magneto motriz:

$$F_{mm} = I_e \cdot N_e \quad \text{Equação 5.24}$$

Por esta equação, pode-se calcular esta força motriz através da corrente de entrada da máquina e do número de espiras que envolverão o estator deste motor. Outra equação para o cálculo da força magneto motriz é a equação 5.25 a seguir:

$$F_{mm} = \oint H \, dl \quad \text{Equação 5.25}$$

O valor da intensidade do campo magnético pode ser determinado pelo gráfico que mostra a densidade de fluxo magnético em função da intensidade de campo magnético em materiais magnéticos. Para escolha do valor médio para H, fez-se a mesma escolha que a feita em [2] e [5] de um valor presente no que se diz “joelho” da curva deste gráfico (entre 1 Tesla e 1,4 Tesla). Este valor representa o momento que o aumento da intensidade do campo já não interfere muito na densidade do fluxo, ou seja, este material começa a saturar.

Como escolha do material foi aço silício de grãos não orientados, o ponto informado anteriormente, no gráfico a seguir é de 1,2 Tesla:

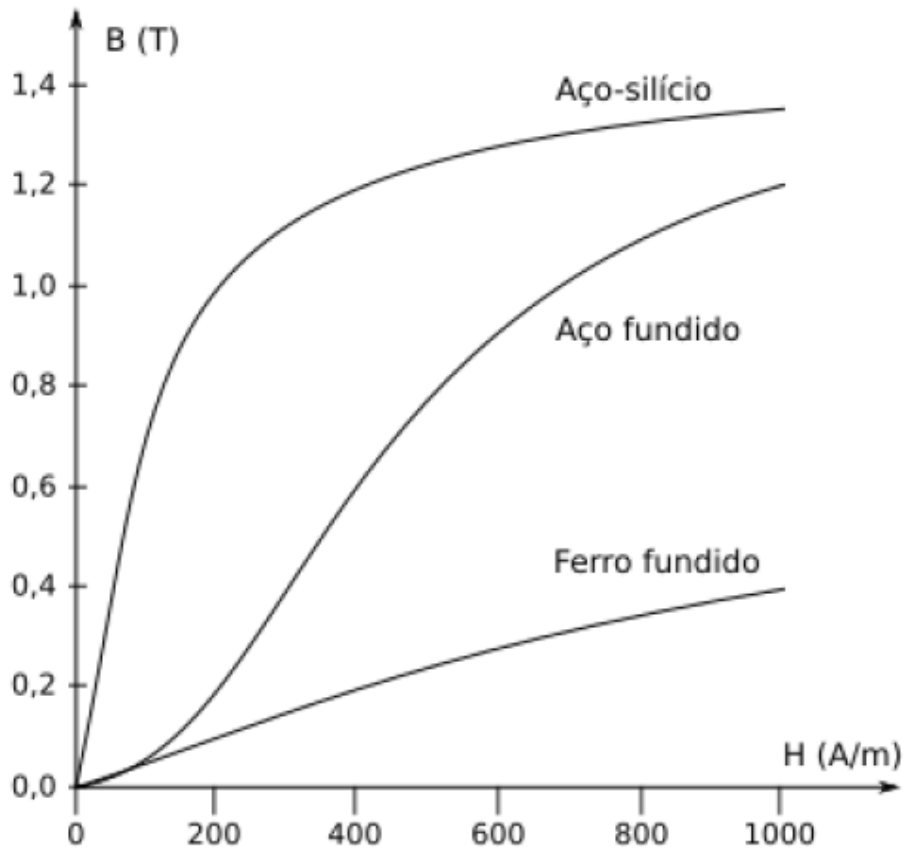


Figura 12 - Densidade do Fluxo Magnético em função da Intensidade do Campo Magnético.

Deve-se, antes, calcular o valor da intensidade do fluxo magnético para uma densidade de fluxo de 1,2 Tesla:

$$H_{ent} = \frac{B_{ent}}{\mu_0} \quad \text{Equação 5.26}$$

Considerando $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$, e, têm-se que:

$$H_{ent} = \frac{1,2}{4 \pi \cdot 10^{-7}}$$

$$H_{ent} = 9,55 \cdot 10^5 \text{ A.e/m}$$

Tendo isso, igualando as equações 5.24 e 5.25, considerando $dl = 2 \times g$, já que o cálculo é para a força eletromotriz produzida nos entreferros em um momento que os polos do rotor estão alinhados com os polos do estator, e já isolando o valor para cálculo do número de espiras, têm-se que:

$$N_e = \frac{H_{ent} \cdot 2 \cdot g}{I_e} \quad \text{Equação 5.27}$$

Substituindo os valores para a máquina 1, têm-se que:

$$N_{e1} = \frac{H_{ent} \cdot 2 \cdot g_1}{I_{e1}}$$

$$N_{e1} = \frac{9,55 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 0,0005}{51,29}$$

$$N_{e1} = 18,60$$

Da mesma forma, para a máquina 2, têm-se que:

$$N_{e2} = \frac{H_{ent} \cdot 2 \cdot g_2}{I_{e2}}$$

$$N_{e2} = \frac{9,55 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 0,0004}{25,65}$$

$$N_{e2} = 29,52$$

E finalmente para a máquina 3:

$$N_{e3} = \frac{H_{ent} \cdot 2 \cdot g_3}{I_{e3}}$$

$$N_{e3} = \frac{9,55 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 0,0003}{12,82}$$

$$N_{e3} = 46,86$$

Arredondados os valores para número inteiros de espiras, tem-se:

$$N_{e1} = 19 \text{ espiras}$$

$$N_{e2} = 30 \text{ espiras}$$

$$N_{e3} = 47 \text{ espiras}$$

Usando o catálogo de dimensionamento em Anexo, assim como feito em [2] e [5], pode-se determinar a área circular do condutor de cobre que será usado por cada máquina. Considerando um dimensionamento calculado pelo fabricante, têm-se um cabo de 3 AWG para a máquina 1, 5 AWG para a máquina 2 e 8 AWG para a máquina 3.

5.6 Conclusão

Desta forma, ficam definidos valores dimensionais para três máquinas de relutância variável com aplicação de carros híbridos. A primeira, e maior, com 40 N.m, a segunda com 20 N.m e a terceira com 10 N.m.

A escolha dos parâmetros iniciais foi possível com base em estudos referentes a carros híbridos e à combustão realizadas e referenciadas.

Os testes e estudos aprofundados referentes à viabilidade econômica, construtiva e comercial das máquinas serão realizados em outro trabalho de outro estudante.

6. Conclusão final

Neste trabalho foram apresentadas características, vantagens e desvantagens do uso de veículos híbridos e elétricos. Evidenciou-se um crescimento na procura deste tipo de veículo como transporte particular pelo mundo todo e, também, no aumento de investimento de governantes e empresas neste tipo de produção.

Junto a isso, também foi estudado o funcionamento geral da máquina a relutância variável. Vantagens e desvantagens do seu funcionamento como máquina elétrica e, também, todo o estudo das características eletromagnéticas.

Foi possível alinhar ambos os conhecimentos obtidos nas referências mencionadas, justificar o motivo do estudo para carros híbridos, o uso de máquina a relutância variável e determinar parâmetros eletromagnéticos condizentes com os valores comuns em veículos híbridos já comercializados.

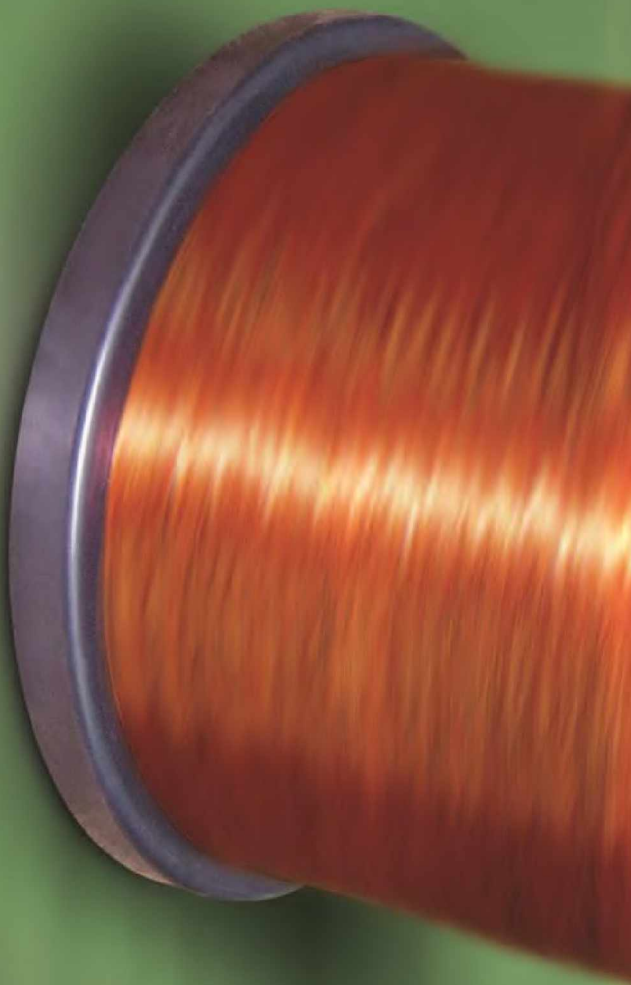
Por último, foi possível dimensionar três tipos de máquinas a relutância variável seguindo roteiros para dimensionamento da máquina seguindo roteiro bem estruturado obtido em referências listadas. Estes valores poderão ser usados em outro trabalho para verificar a viabilidade eletromagnética e mecânica do uso destas máquinas em veículos já existentes e puramente a combustão.

7. Referências

- [1] ACEA (2021), **Fuel types of new cars: battery electric 5.7%, hybrid 18.4%, petrol 42.2% market share in Q1 2021**, ACEA. Disponível em: <https://www.acea.be/press-releases/article/fuel-types-of-new-cars-battery-electric-5.7-hybrid-18.4-petrol-42.2-market>. Acessado em 26 de abril de 2021.
- [2] DIAS, Renato J., “**Inovações no Projeto de Geradores a Relutância Variável com Estudo das Influências da Saturação Magnética e das Indutâncias Mútuas**” Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais. Abril, 2017.
- [3] Silveira, Augusto F. V., **Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado**. Tese de doutorado – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais. 2008.
- [4] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A. Electric Machinery, th 7 Edition, McGraw-Hill Inc, 2014.
- [5] AGUIAR, Raphael Rodrigues; ALVES, Charles Pacheco; FERREIRA, Fabrício Augusto. **Projeto e Construção de Duas Máquinas a Relutância Variável 8x6 e 12x8**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.
- [6] BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**: volume 1. Franco Brunetti. – São Paulo: Blucher, 2012.
- [7] BRAGA, Newton C. **Eletrônica Automotiva**: 1ª edição. Newton C. Braga – São Paulo – Brasil, 2013.
- [8] CARVALHO, Rogério Nascimento de; VILELA, Antônio Carlos Scardini; BOTERO, Sérgio William. **Desempenho de Gasolinas em Motor do Ciclo Atkinson**. Blucher, 2021. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/simea2019/PAP127.pdf>. Acesso em 01 de ago. de 2021.
- [9] ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário Estatístico 2021**. Disponível em: <<https://anfavea.com.br/anuario2021/anuario.pdf>>. Acesso em: 01 de ago. de 2021.
- [10] IEA (2021). **Global EV Outlook 2021**, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>. Acesso em 01 de ago. de 2021.
- [11] FGV ENERGIA (2017). **Carros Elétricos**. Accenture – Rio de Janeiro – Brasil, 2017.
- [12] CENCI, Arthur Ely. **Veículos Elétricos e Seu Impacto na Demanda de Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2019.

- [13] PEREIRA, Bruno César Fernandes. **Evolução de uma Unidade de Gerenciamento Eletrônico de um Motor VW 2.0L e Desenvolvimento e Controle de Cruzeiro: Projeto Otto IV**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [14] NOBELS, Tiene; GHEYSEN, Th; VANHOVE, M.; STEVENS, S. **Design considerations for a plug-in hybrid car electrical motor**. *2009 International Conference on Clean Electrical Power*, 2009, pp. 755-759. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5211966>. Acesso em 01 de ago. de 2021.
- [15] Best Cars Web Site (2021). **Fiat Mille Economy – Avaliação Completa**. Disponível em: <https://www.bestcars.com.br/testes3/fiat-mille-economy-way-3.htm>. Acesso em; 02 de out. de 2021.
- [16] FREITAS, Joaquim Carlos Novais. **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho, Guimarães, 2012;
- [17] SARLIOGLU, Bulent. **Automotive Power Electronics: Current Status and Future Trends**. Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin – Madison, USA.

FIOS ESMALTADOS



Anexo A



CATÁLOGO DE FIOS METALCORTE/EBERLE

A Metalcorte/Eberle Motores Elétricos, tradicional fabricante de motores elétricos, coloca à disposição do mercado a linha original de fios esmaltados. Após muitos anos de desenvolvimento e sempre em busca de melhoria contínua, os fios esmaltados Metalcorte/Eberle alcançaram excelente padrão de qualidade, atendendo normas nacionais e internacionais.

NOMENCLATURA	CLASSE TÉRMICA	APLICAÇÕES
EBM 180 Metalterm	H (180°)	É utilizado, em geral, para enrolamentos de motores e transformadores de todos os tipos, que sejam exigidas altas condições de temperatura.

NBR 6727/NBR 5428/NBR 6776

 - Aprovado pelo Underwrites Laboratories Inc. (UL)(E 155802)

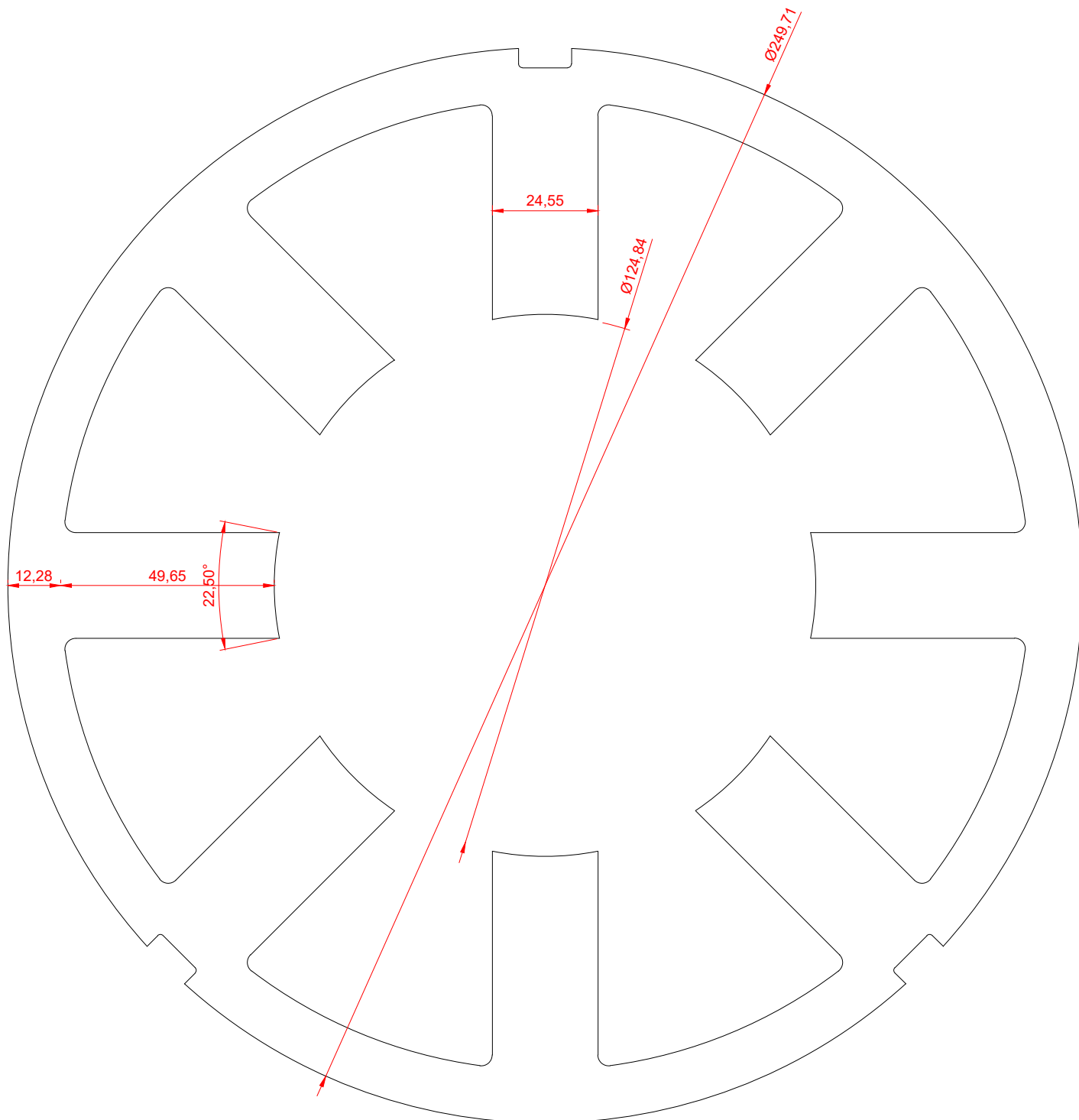
TABELA DE DIMENSÕES

Bitola AWG	FIO DE COBRE NU						FIO DE COBRE ESMALTADO			
	Diâmetro(mm)			Secção (mm²)	Resistência Elétrica (Ω/m)	Intensidade de Corrente		GRAU 2 OU CAPA REFORÇADA		
	nominal	min.	máx.			Prático (A)	Segurança (A)	Acréscimo do Isolante (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Rigidez Diéletrica (V)
1	7,350	7,280	7,420	42,4	-	86,4	55,7	-	-	-
2	6,540	6,470	6,610	33,6	-	83,7	44,1	-	-	-
3	5,830	5,770	5,890	26,7	-	52,6	35	-	-	-
4	5,189	5,137	5,241	21,147	-	41,7	27,7	94	5,329	3700
5	4,620	4,574	4,666	16,764	-	33,1	22	91	4,755	3600
6	4,115	4,074	4,156	13,229	-	26,3	17,5	89	4,244	3500
7	3,665	3,628	3,702	10,550	-	20,8	13,8	86	3,787	3400
8	3,264	3,231	3,297	8,367	-	16,5	11	84	3,383	3300
9	2,906	2,877	2,935	6,633	-	13,1	8,7	81	3,020	3200
10	2,588	2,562	2,614	5,260	-	10,4	6,9	79	2,695	6200
11	2,304	2,281	2,327	4,169	-	8,2	5,5	76	2,408	6000
12	2,052	2,031	2,073	3,307	-	6,5	4,4	74	2,151	5800
13	1,829	1,811	1,847	2,627	-	5,2	3,5	71	1,923	5600
14	1,628	1,612	1,644	2,082	-	4,1	2,7	81	1,732	6325
15	1,450	1,435	1,465	1,651	-	3,3	2,2	76	1,547	6175
16	1,290	1,277	1,303	1,307	-	2,6	1,7	74	1,384	6000
17	1,151	1,139	1,163	1,040	-	2	1,3	71	1,240	5850
18	1,024	1,014	1,034	0,8235	-	1,6	1,1	66	1,110	5700
19	0,912	0,903	0,921	0,6533	0,026	1,3	0,86	64	0,993	5550
20	0,813	0,805	0,821	0,5191	0,033	1	0,68	58	0,892	5400
21	0,724	0,717	0,731	0,411	0,042	0,81	0,54	56	0,798	5250
22	0,643	0,637	0,649	0,3247	0,054	0,64	0,43	53	0,714	5125
23	0,574	0,568	0,580	0,2588	0,068	0,51	0,34	51	0,643	5000
24	0,511	0,506	0,516	0,2051	0,085	0,41	0,27	48	0,577	4850
25	0,455	0,450	0,460	0,1626	0,108	0,32	0,21	46	0,516	4725
26	0,404	0,400	0,408	0,1282	0,137	0,25	0,17	43	0,462	4600
27	0,361	0,357	0,365	0,1024	0,172	0,20	0,13	41	0,417	4500
28	0,32	0,317	0,323	0,0804	0,218	0,16	0,11	41	0,373	4375
29	0,287	0,284	0,290	0,0647	0,272	0,18	0,084	38	0,338	4250
30	0,254	0,251	0,257	0,050	0,348	0,10	0,067	36	0,302	4150
31	0,226	0,223	0,229	0,0401	0,441	0,078	0,053	33	0,274	3825
32	0,203	0,200	0,206	0,0324	0,548	0,063	0,042	30	0,249	3525
33	0,180	0,177	0,183	0,0254	0,700	0,050	0,033	28	0,224	3250
34	0,160	0,157	0,163	0,0201	0,890	0,039	0,026	25	0,193	2975
35	0,142	0,139	0,145	0,0158	1,136	0,032	0,021	23	0,176	2750
36	0,127	0,124	0,130	0,0127	1,427	0,025	0,017	20	0,160	2525
37	0,114	0,111	0,117	0,0102	1,781	0,020	0,013	20	0,145	2325
38	0,102	0,099	0,105	0,0082	2,239	0,016	0,010	18	0,130	2150
39	0,089	0,086	0,092	0,0062	2,968	0,012	0,008	15	0,114	1975
40	0,079	0,076	0,082	0,0049	3,800	0,009	0,006	15	0,102	1800
41	0,071	0,068	0,074	0,0040	4,747	0,008	0,005	13	0,091	1675
42	0,064	0,061	0,067	0,0032	5,973	0,006	0,004	10	0,081	1525
43	0,056	0,053	0,059	0,0025	7,560	0,005	0,003	10	0,074	1400
44	0,051	0,048	0,054	0,0020	9,115	0,004	0,002	10	0,069	1300

Aços Planos
RST 453, Km 2,2 - Distrito Industrial - Cx. Postal 938 - CEP: 95110-690 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3025 9500 Fax: (0xx54) 3025 9514
Fundição
Rua Dom José Barea, 1501 - Exposição - CEP: 95080-100 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3026 3100 Fax: (0xx54) 3026 3135
Eberle Motores Elétricos
BR 116, KM 145, nº 5.000 - São Ciro - CEP: 95059-520 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3026 3400 Fax: (0xx54) 3026 3401
www.metalcorte.com
metalcorte@metalcorte.com



EBERLE
MOTORES ELÉTRICOS
Uma empresa **Metalcorte**



00	23/12/2021	EMISSÃO INICIAL
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO

PROJETO:
MÁQUINA 1 - 17,08 CV 40 N.M

CONTEÚDO:
01. DIMENSÕES DO ESTATOR - MÁQUINA 1

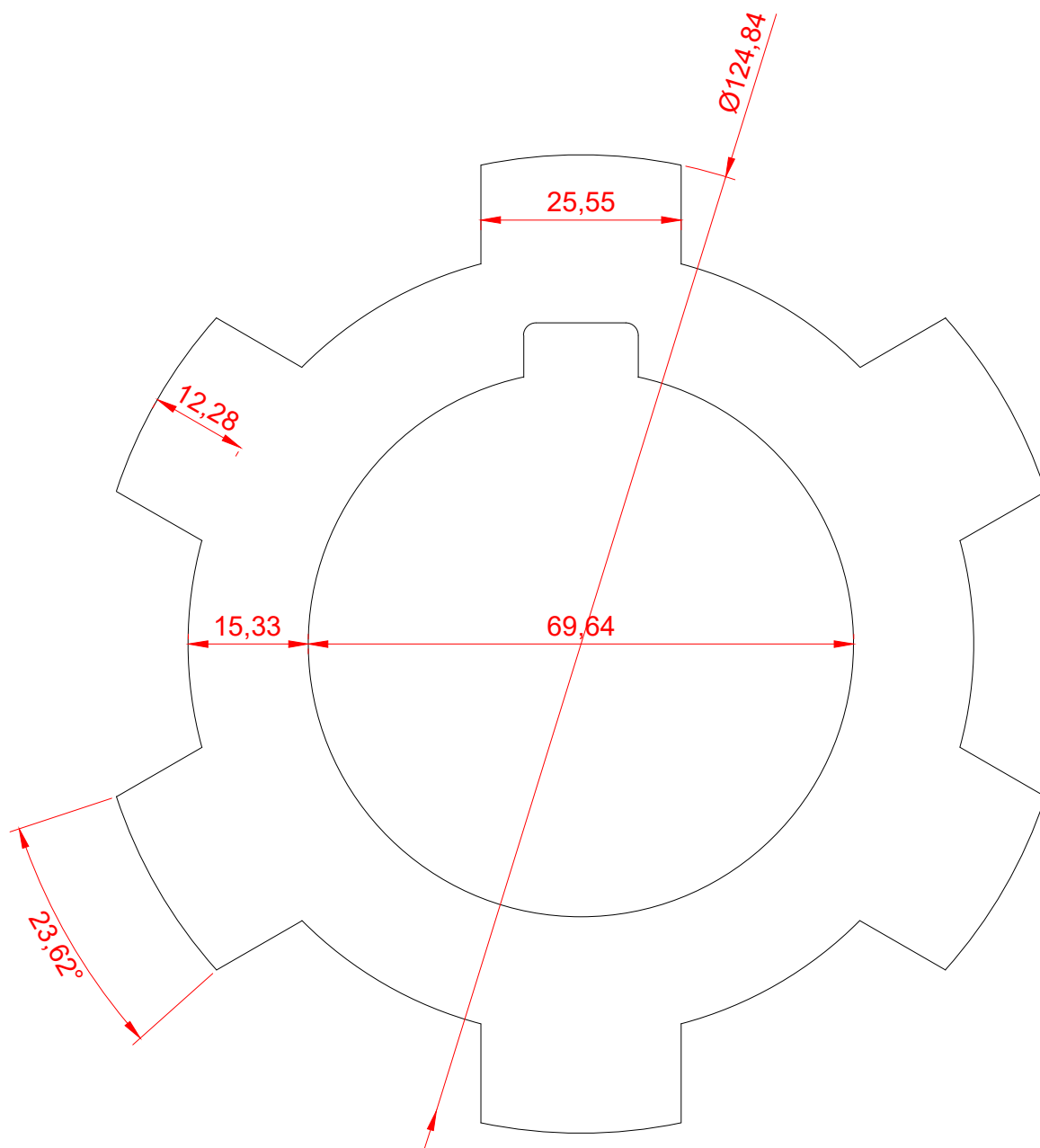
MÊS/ANO:
DEZEMBRO / 2021

ESCALAS:
INDICADAS

AUTOR DO PROJETO:

Danielle Bernardes / José Maurício

FOLHA:
1 / 2



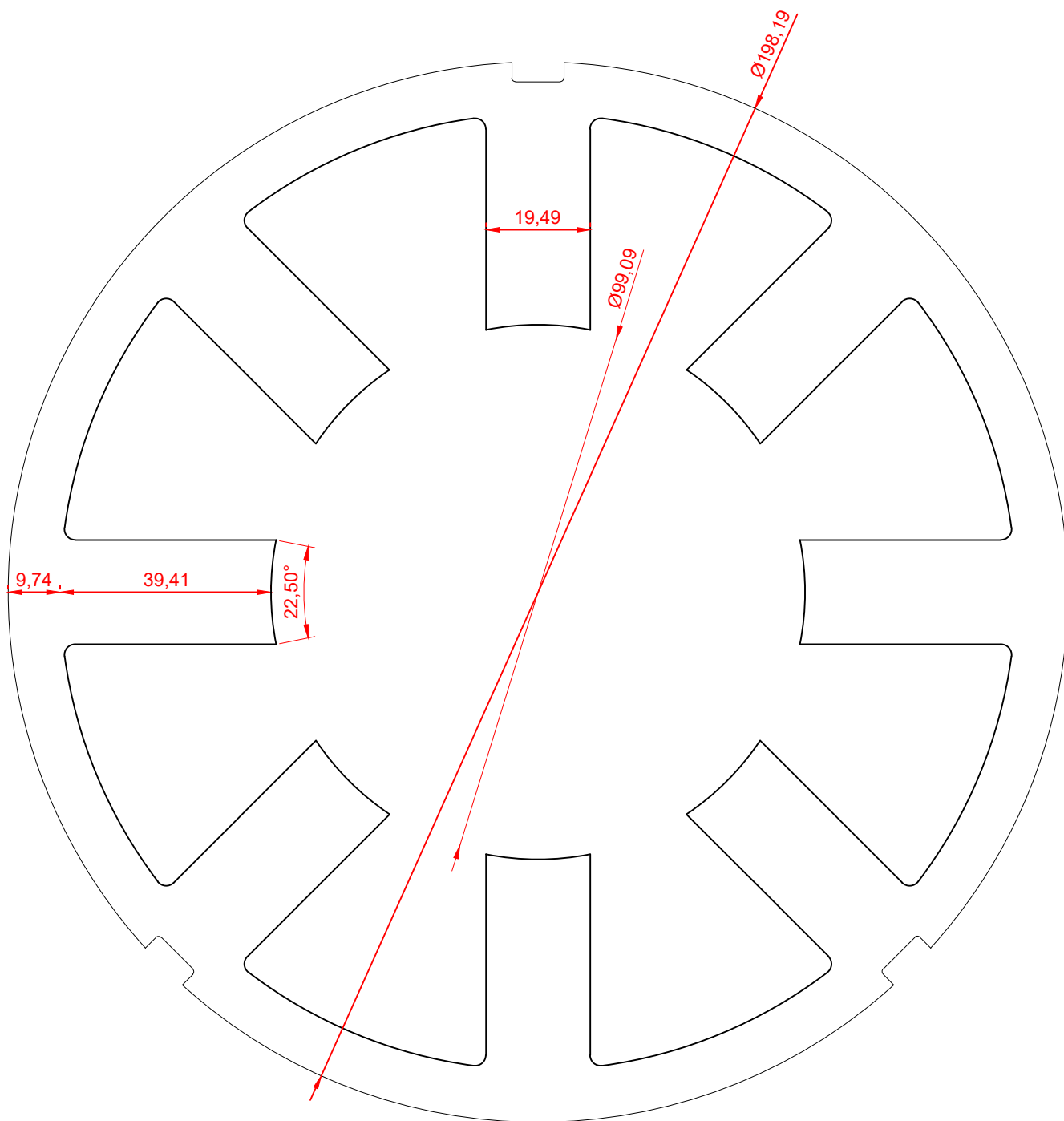
00	23/12/2021	EMISSÃO INICIAL
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO

PROJETO:

MÁQUINA 1 - 17,08 CV 40 N.M

CONTEÚDO:	MÊS/ANO:
01. DIMENSÕES DO ROTOR - MÁQUINA 1	DEZEMBRO / 2021
AUTOR DO PROJETO:	ESCALAS:
Danielle Bernardes / José Maurício	INDICADAS
FOLHA:	
2 / 2	

FORMATO: A4



00	23/12/2021	EMIÇÃO INICIAL
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO

PROJETO:

MÁQUINA 2 - 8,54 CV 20 N.M

CONTEÚDO:

01. DIMENSÕES DO ESTATOR - MÁQUINA 2

MÊS/ANO:

DEZEMBRO / 2021

ESCALAS:

INDICADAS

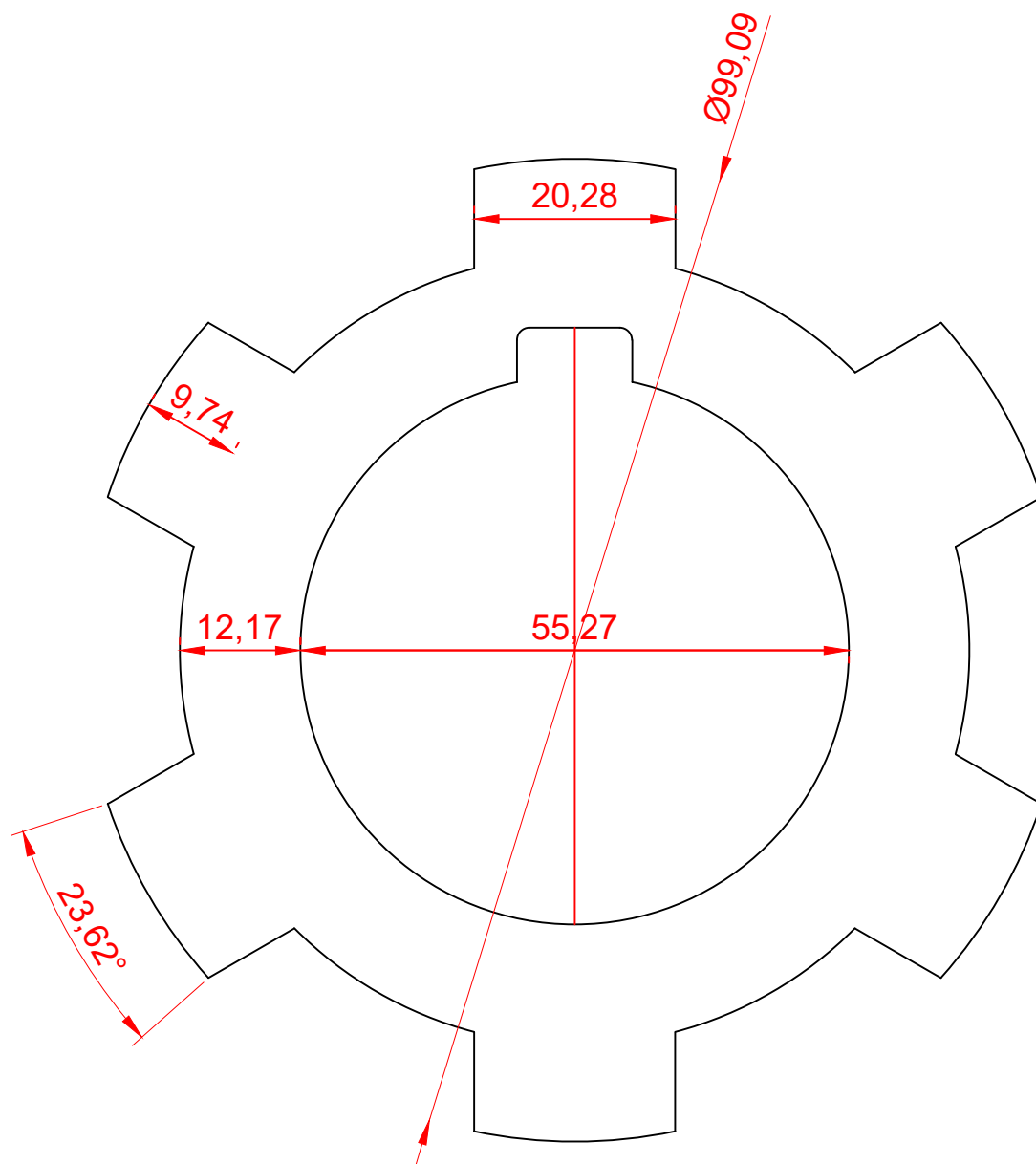
AUTOR DO PROJETO:

Danielle Bernardes / José Maurício

FOLHA:

1 / 2

FORMATO: A4



00	23/12/2021	EMIÇÃO INICIAL
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO

PROJETO:

MÁQUINA 2 - 8,54 CV 20 N.M

CONTEÚDO:

01. DIMENSÕES DO ROTOR - MÁQUINA 2

MÊS/ANO:

DEZEMBRO / 2021

ESCALAS:

INDICADAS

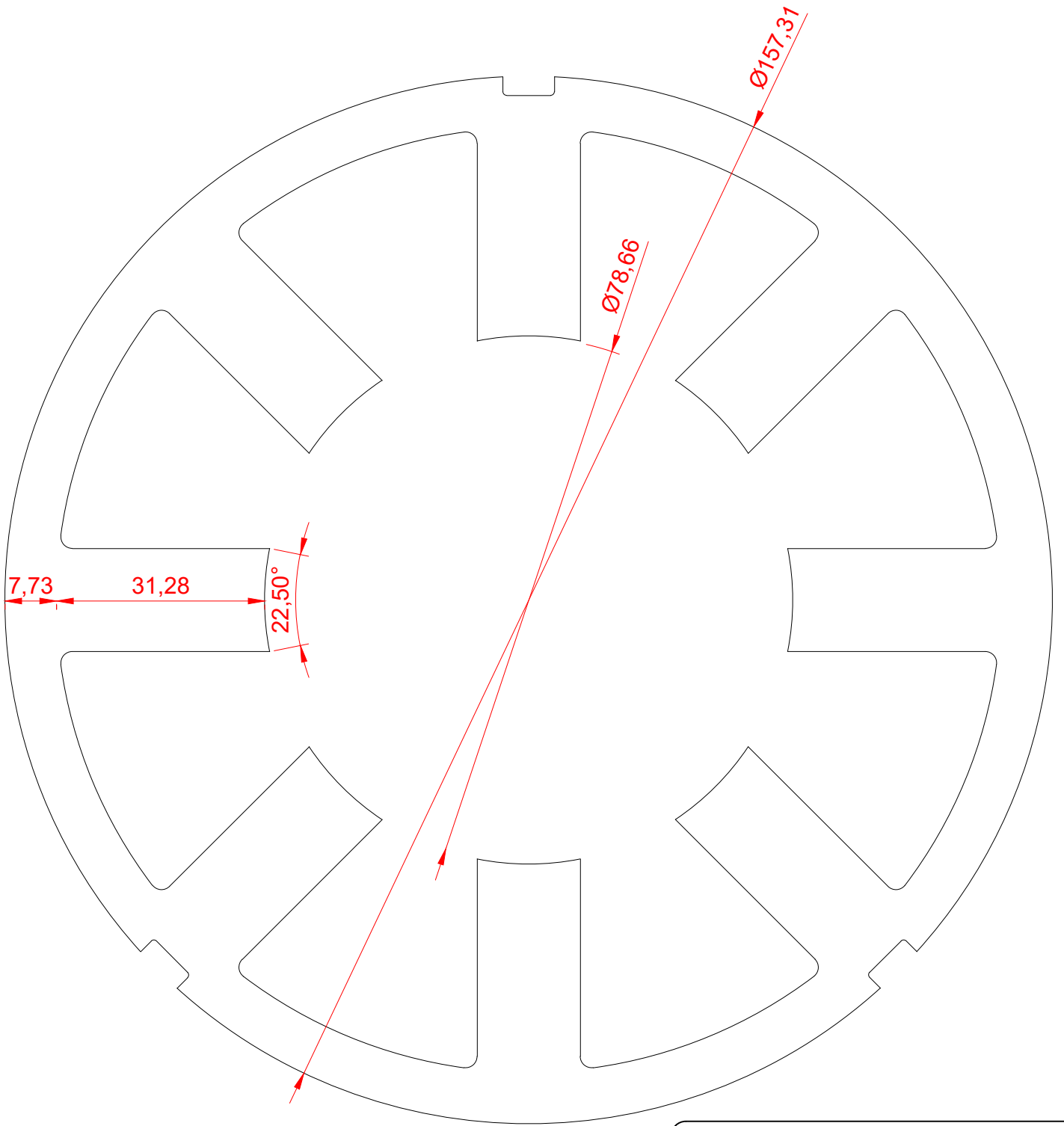
AUTOR DO PROJETO:

Danielle Bernardes / José Maurício

FOLHA:

2 / 2

FORMATO: A4



00	23/12/2021	EMIÇÃO INICIAL
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO

PROJETO:

MÁQUINA 3 - 4,27 CV 10 N.M

CONTEÚDO:

01. DIMENSÕES DO ESTATOR - MÁQUINA 3

MÊS/ANO:

DEZEMBRO / 2021

ESCALAS:

INDICADAS

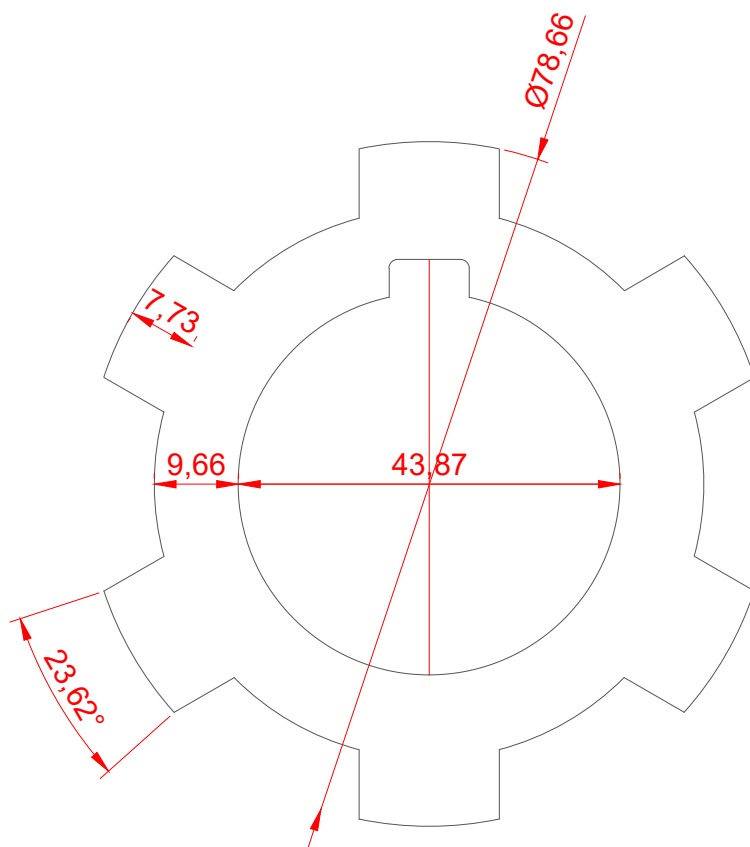
AUTOR DO PROJETO:

Danielle Bernardes / José Maurício

FOLHA:

1 / 2

FORMATO: A4



00	23/12/2021	EMISSÃO INICIAL
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO

PROJETO:

MÁQUINA 3 - 4,27 CV 10 N.M

CONTEÚDO:

01. DIMENSÕES DO ROTOR - MÁQUINA 3

MÊS/ANO:

DEZEMBRO / 2021

ESCALAS:

INDICADAS

AUTOR DO PROJETO:

Danielle Bernardes / José Mauricio

FOLHA:

2 / 2

FORMATO: A4