

ESTUDO DO MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE ESTATOR COMPARTILHADO E DUPLO ROTOR SEGMENTADO PARA APLICAÇÃO EM CARROS ELÉTRICOS

Jean Lescowicz, Arthur Garcia Bartsch
Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica
e-mail: jean.l06@aluno.ifsc.edu.br, arthur.bartsch@ifsc.edu.br
Trabalho de Conclusão de Curso – 06/07/2022

Resumo – Esse artigo tem como objetivo trazer uma revisão sobre veículos elétricos e a simulação do conjugado e indutância de uma máquina elétrica de duplo rotor. Assim o artigo inicia trazendo uma contextualização da situação passada e atual dos veículos elétricos. Após isso é feita uma revisão sobre os tipos de veículos elétricos existentes, suas topologias e os seus componentes. Na sequência, realiza-se um estudo da máquina de relutância convencional e a análise de uma novo tipo de máquina de relutância de duplo rotor segmentado e estator compartilhado para aplicação em carros elétricos. A análise das simulações realizadas confirmam a proposta de compartilhar o mesmo estator para acionar duas máquinas distintas.

Palavras-chave – Motor de relutância variável, Veículos elétricos, Máquina de duplo rotor

STUDY OF A DOUBLE SEGMENTED ROTOR SWITCHED RELUCTANCE MACHINE WITH SHARED STATOR FOR APPLICATION IN ELECTRIC CARS.

Abstract – This paper aims to bring a review of electric vehicles and the simulation of the torque and inductance of a double rotor electric machine. Thus, the paper begins by bringing a contextualization of the past and current situation of electric vehicles. After that, a review is made of the types of existing electric vehicles, their topologies and their components. Next, a study of the conventional switched reluctance machine is carried out and the analysis of a new type of segmented double-rotor and shared stator switched reluctance machine for application in electric cars is carried out. The analysis of the simulations carried out confirm the proposal of sharing the same stator to drive two different machines.

Keywords – Switched Reluctance Motor, Electric Vehicles, Double Rotor Machine

I. INTRODUÇÃO

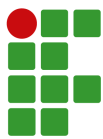
Veículos movidos a combustíveis fósseis são uma das maiores fontes de gases do efeito estufa (GHG) em todo o mundo [1]. Em virtude disso a eletrificação dos meios de transporte é vista como uma solução para a redução de poluentes atmosféricos bem como o uso de combustíveis fósseis [2] [3]. Esta eletrificação acontece substituindo a propulsão que antes era fornecida por um motor de combustão interna (ICE), por um motor elétrico (EM). A tecnologia de carros elétricos subdivide-se principalmente em duas categorias: carros totalmente elétricos (BEVs) e carros híbridos (HEV).

Os BEVs, apesar de possuírem emissão zero, possuem autonomia mais baixa e, além disso, uma dependência maior das baterias, o que eleva seu custo de aquisição e tempo de recarga. Em contrapartida, os HEVs possuem maior autonomia e eficiência quando comparado a um veículo ICE [3]. Além disso, possuem duas fontes de energia, aumentando a confiabilidade do sistema e tornando atrativo pelo ponto de vista econômico dadas as flutuações nos preços da energia elétrica e dos combustíveis.

De toda forma, o custo dos carros elétricos ainda é elevado. Um dos fatores que amplia o custo desses veículos é o uso de motores de ímãs permanentes (IPM) de terras raras (RE). Estes ímãs são feitos, em sua maioria, de uma liga metálica composta por Neodímio Ferro e Boro (NdFeB). Aproximadamente 50% das reservas conhecidas de Nd se encontram na China, que na década passada controlava mais de 90% da produção deste tipo de material [4]. No ano de 2011, uma combinação de fatores econômicos levou o preço do metal Nd a crescer mais de 20 vezes normalizando anos depois. Isso fez com que as indústrias produtoras de motores de tração pensassem em alternativas ao uso de ímãs de RE em suas máquinas. Dentre várias alternativas as mais consideráveis são os Motores de Indução (IM), Motores de Relutância Síncrona (SynR) e por fim Motores de relutância variável (SRM) [4].

Portanto, o presente trabalho propõe o estudo da situação atual dos carros elétricos e a análise e comprovação de um estudo de caso com a aplicação de um motor de relutância variável com dois rotores.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II, é apresentado um Panorama Geral dos carros elétricos,



abrangendo o contexto atual bem como seus principais componentes como Conversores baterias e Motores. Na seção III é explicado o princípio de funcionamento da máquina de relutância variável. A seção IV é dedicada a especialmente a máquinas de duplo rotor, envolvendo Aplicações e o Acionamento. O estudo de caso é feito na seção V compreendendo o projeto da máquina e a análise dos resultados. Por fim, na seção VI são expressas as conclusões do desenvolvimento deste trabalho.

II. PANORAMA GERAL DOS CARROS ELÉTRICOS

Quando se fala em veículos elétricos (EVs), é comum que a primeira imagem associada a este termo seja a de um carro elétrico. Porém, os EVs compreendem todos os veículos onde ao menos uma fonte de propulsão é feita por um motor elétrico [2]. A título de conhecimento, é importante ressaltar que existem ainda outros EVs além dos carros com aplicações "fora de estrada" [5]. Estes veículos apesar de terem o funcionamento semelhante aos carros, se diferem em aspectos como: capacidade de carga, demanda de energia e robustez. Podem ser observados na Figura 1 exemplos destes veículos como: Locomotivas, navios, veículos de mineração, tratores e aeronaves.



Fig. 1. Locomotiva Diesel-Elétrica, Navio com Sistema Azipod®, Veículo de Mineração Liebherr T282 B e Aeronave Eviation Alice. Adaptado de [5]

Observada a vastidão desta área, este trabalho irá manter, nas próximas subseções sobre EVs, seu foco sobre os carros elétricos.

A. Contexto dos carros elétricos

Iniciando pelo histórico, pode-se afirmar que o primeiro EV foi desenvolvido em 1834. Durante o final do século XIX, haviam várias montadoras de EVs na América do Norte e Europa. Nesta época, em Londres, existiam carros elétricos na companhia de táxis. Contudo, devido às limitações das baterias e com o rápido avanço nos motores de combustão interna, os EVs foram extintos em meados de 1930 [6].

Tratando agora de veículos híbridos, em 1898 o Dr. Ferdinand Porsche fabricou o primeiro HEV chamado de *Lohner Electric Chaise*. Para isso ele utilizou um motor de combustão interna acionando um gerador, este por sua vez fornecia energia elétrica para os motores de tração que ficavam localizados no cubos das rodas dianteiras [3]. A Figura 2 mostra um exemplar deste veículo.

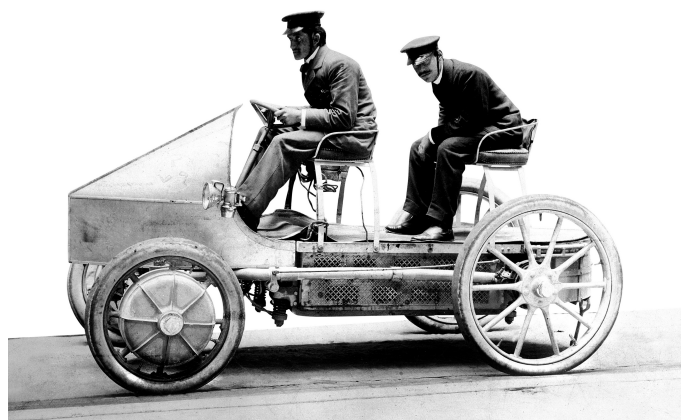


Fig. 2. Veículo *Lohner Electric Chaise*. Retirado de [7]

Em 1900 a fabricante de carros Belga *Pieper* apresentou seu modelo *Voiturette* de 3,5 cv. Nele seu pequeno motor a gasolina ficava acoplado a um motor elétrico. Quando o carro estava rodando em cruzeiro, este motor elétrico atuava como gerador recarregando as baterias. Porém, quando o carro tivesse que subir a um aclive, o motor elétrico operava em conjunto com o motor a combustão fornecendo um auxílio de potência. As patentes deste fabricante foram usadas também pela Belga *Auto-Mixte*, para a produção de veículos comerciais de 1906 a 1912. Em 1903 a francesa Companhia de Veículos Elétricos Kriéger, utilizou um motor a gasolina como complemento ao banco de baterias de seu veículo elétrico. Em 1904, o industrial norte americano Henry Ford, conseguiu superar os problemas que existiam nos carros movidos a gasolina, como ruído, vibração e o mau cheiro. Após isso, ele inicia a montagem de veículos a combustão com partida automática, leves e baratos. Isso faz com que a demanda por veículos híbridos caia ocasionando a parada da sua produção em 1920 [6]. Em 1839, William Groove inicia os estudos com células de combustível, no entanto não fora possível aproveitar essa tecnologia pois a eletricidade não era tão conhecida. Mais de 100 anos depois, em 1950, elas foram usadas nos programas espaciais Apollo, Gemini e *Space Shuttle* por serem uma fonte de eletricidade mais seguras que a nuclear, mais compactas que a solar e mais leves que as baterias. Em 1967 a *General Motors* desenvolve um veículo com capacidade para seis passageiros denominada *Electrovan* para uso interno da companhia, por razões de segurança [6]. Na Figura 3 pode-se observar o veículo mencionado.

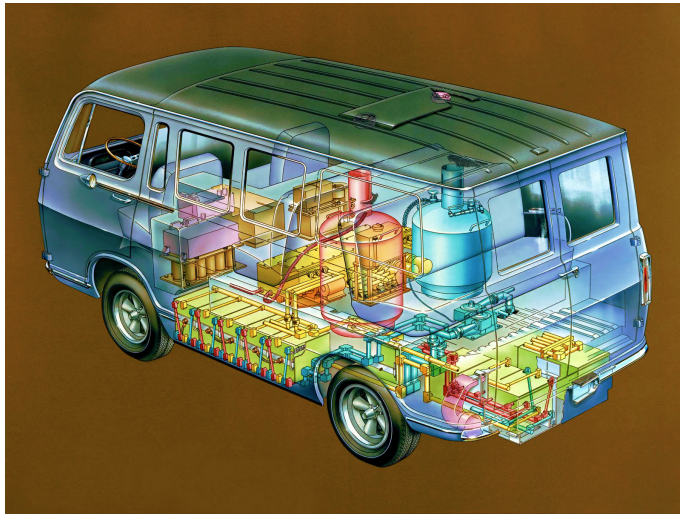
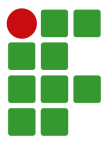


Fig. 3. Veículo *Electrovan*. Retirado de [8]

Como foi visto, desde a década de 1930 os EVs representam uma parcela muito pequena da frota mundial, em relação aos Veículos ICE. Mas essa situação inicia uma mudança em meados de 1970. No ano de 1972, foi publicado um livro pelo Clube de Roma chamado *Limites para o Crescimento* chamando a atenção para o limite da exploração de recursos naturais não renováveis, como o petróleo [9]. Em 1973, ocorre a crise do petróleo causando o racionamento do produto e a alta de preço em vários países. Estes acontecimentos fizeram com que algumas nações voltassem se interessar pelos veículos de propulsão elétrica [9]. Nesse período, foram desenvolvidos protótipos de BEVs e HEVs mas ainda não conseguiam competir no mercado Americano com os Veículos ICE. Foi somente em 1997 que esse cenário começa a mudar com o lançamento do Toyota Prius, um sedã híbrido, no mercado Japonês. No ano 2000, ele chega ao mercado Americano e se torna um sucesso de vendas. Vale lembrar que na mesma época outras grandes montadoras como Audi, Honda e Ford também estavam lançando modelos nos mercados Europeu, Asiático e Americano.

Para finalizar, será exposto alguns dados relevantes sobre os EVs no contexto atual. Nos dados a seguir serão usados o termo PHEV que também se refere aos veículos Híbridos. A Figura 4 mostra a quantidade de carros elétricos existentes no mundo no período de 2010 até 2021 de acordo com a Agencia Internacional de Energia (IEA) [10]. Em 2012 existiam 115 mil BEVs e 70 mil PHEVs aproximadamente, totalizando 185 mil carros elétricos. Já no ano de 2021 foram contabilizados 11,2 milhões BEVs e 5,2 milhões PHEVs aproximadamente, totalizando 16,4 milhões de unidades de carros elétricos.

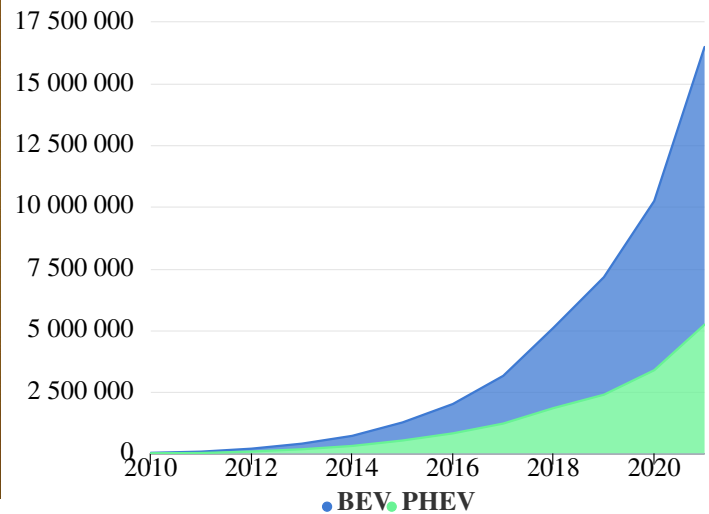


Fig. 4. Quantidade de carros elétricos no mundo. Retirado de [10]

Abordando agora o contexto nacional, a Figura 5 exhibe a quantidade de carros elétricos no Brasil. No ano de 2012, existiam 120 BEVs e 28 PHEVs aproximadamente, totalizando 148 carros elétricos. Já no ano de 2021 foram contabilizados 3,6 mil BEVs e 9 mil PHEVs aproximadamente, totalizando 12,6 mil unidades de carros elétricos em solo nacional.

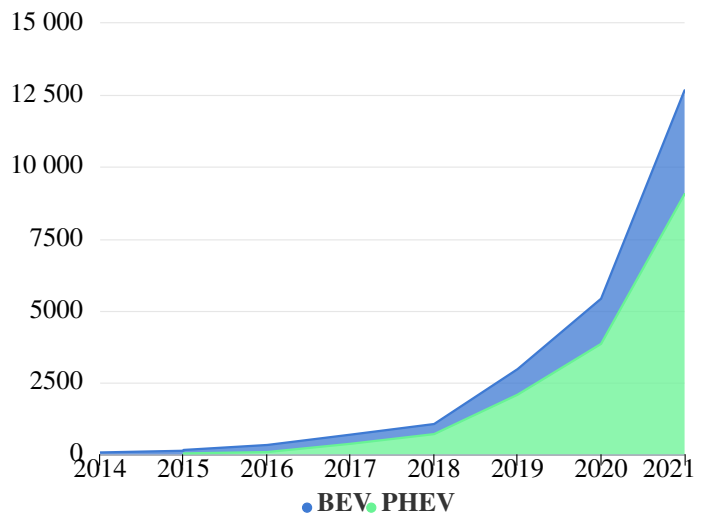


Fig. 5. Quantidade de carros elétricos no Brasil. Retirado de [10]

Em vista disso, podemos observar dois pontos principais. O primeiro é que o crescimento da quantidade de carros elétricos está acontecendo de acordo com um comportamento exponencial. O segundo é que, no resto do mundo os BEVs representam a maioria dos EVs. Na frota Brasileira acontece um comportamento diferente onde os PHEVs são maioria, podendo existir aproximadamente 3 PHEVs para cada BEV.



B. Tipos de carros elétricos

Os EVs são classificados em três categorias principais de acordo com a configuração de seus *powertrains*: Veículos elétricos *Plug in* (PEVs), Veículos elétricos híbridos convencionais (HEVs) e Veículos elétricos à célula de combustível (FCEVs). Além disso, a categoria PEV é dividida em outras duas: Veículos elétricos à bateria (BEVs) e Veículos híbridos *Plug in* [1]. O diagrama na Figura 6 resume esta relação entre as classificações. O termo *Plug in*, utilizado para nomear as categorias, está relacionado a capacidade do veículo ser “plugado” à rede de distribuição, para o carregamento de suas baterias.

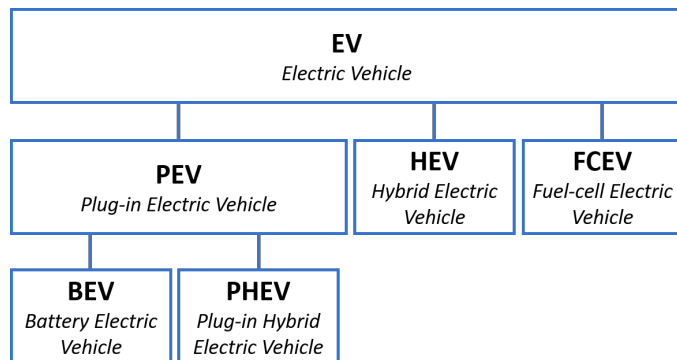


Fig. 6. Tipos de EVs. Próprio autor.

Um BEV é um veículo impulsionado unicamente por um motor elétrico, isso garante que seja um veículo de emissão zero. Porém, para fornecer a energia necessária durante a operação, ele necessita de um grande banco de baterias que deve ser capaz de suprir toda a demanda do veículo. Este banco de baterias é carregado principalmente pela rede elétrica. Alguns veículos contam com um sistema de frenagem regenerativa. Este sistema faz com que durante as frenagens, o motor passe a atuar como um gerador. Desta forma a energia que seria dissipada em forma de calor pelas pastilhas de freio é transformada novamente em energia elétrica recarregando banco de baterias. Visto que os BEVs utilizam unicamente um motor elétrico para a tração caracterizado pelo uso de baterias como fonte principal de energia durante a operação [1].

Assim como no BEV as baterias do PHEV também podem ser carregadas pela rede elétrica. Todavia ele possui também um ICE operando com gasolina/álcool ou diesel. Desta forma, o banco de baterias é menor. Possui também uma unidade de controle inteligente que monitora constantemente a situação do ambiente e controla o uso de ambos os motores (elétrico e combustão). Sua principal vantagem é que pode percorrer uma distância maior quando comparado ao BEV [1].

Semelhante ao PHEV, o HEV também possui um motor elétrico e um ICE. Porém, utiliza para tração prioritariamente o ICE. Diferente do PHEV, ele não possui conexão para o carregamento de seu banco de baterias. Este carregamento fica a cargo unicamente do sistema regenerativo. A principal função

do banco de baterias e o motor elétrico nesses carros é aumentar a eficiência do consumo de combustível [1].

O FCEV é abastecido com hidrogênio e extrai energia elétrica deste elemento através das células de combustível. Essa energia é usada tanto para alimentar o motor elétrico de tração quanto para carregar suas baterias. As células de combustível geram energia elétrica através de uma reação química que ocorre com o hidrogênio em contato com o oxigênio. Nessa forma de geração de energia, o hidrogênio não é “queimado” como em um ICE, e o subproduto dessa reação é a água, logo, não produz poluentes [6]. A Tabela I compila as características destes EVs.

C. Topologias dos HEVs

Um ponto importante para se estudar nos EVs é a sua topologia. Os HEVs utilizam mais de uma fonte propulsão como motores elétricos (EM) em conjunto com motores de combustão interna (ICE). Como já mencionado o ICE é a principal fonte de potência neste tipo de EV, responsável pela maior parte da energia utilizada pelo veículo. Já o EM é a fonte de potência auxiliar, encarregado de suprir picos de demanda de potência e ajudar na economia do ICE. O EM também recarrega as baterias de duas maneiras: Aproveitando a potência excedente produzida pelo ICE, e regenerando a energia cinética do veículo durante as frenagens [3]. O projeto e o controle do *powertrain* requerem avançados algoritmos de controle otimizando vários objetivos como, economia de combustível, estado da carga das baterias e as restrições de operação. O *powertrain* de um HEV é constituído basicamente por ICE, um motor elétrico de tração, um conversor eletrônico de potência, um sistema de armazenamento de energia (ESS) e a unidade de controle. A integração destes componentes resulta nas configurações mencionadas a seguir [11].

D. Topologia série

Nesta, a saída mecânica do ICE é primeiramente convertida em energia elétrica por meio de um gerador. Conforme mostrado na Figura 7. Esta energia pode, tanto carregar as baterias quanto alimentar diretamente o EM e tracionar as rodas por meio da transmissão mecânica. Percebe-se que as rodas nunca estarão diretamente acopladas ao ICE, isso traz grande flexibilidade para o posicionamento físico do grupo gerador no veículo. Embora tenha a vantagem da simplicidade, ele necessita de três máquina de propulsão: um ICE, um gerador e um motor. E também todas essas máquinas precisam ser dimensionadas para a potência máxima que será demandada [6]. Com isso a topologia série pode operar em seis diferentes modos:

1. ESS sozinha: ESS fornece energia ao EM.
2. ICE sozinho: Gerador fornece energia ao EM
3. Modo Combinado: Tanto o ICE quanto o ESS fornecem energia de tração.
4. Modo Divisor de potência: O ICE fornece energia tracionar o veículo e carregar as baterias.
5. Modo de carregamento da bateria.

TABELA I
Características dos BEVs, HEVs e FCEVs

Tipos de Evs	BEVs	HEVs e PHEVs	FCEVs
Tração	Motor Elétrico	Motor Elétrico Motor de Combustão Interna	Motor Elétrico
Sistema de Energia e Infraestrutura	Bateria Supercapacitor	Bateria Supercapacitor Unidade de Geração com ICE	Célula de Combustível Bateria Supercapacitor
Fonte de Energia	Rede elétrica e Instalações de carregamento	Postos de combustível Rede elétrica e Instalações de carregamento	Hidrogênio Infraestrutura de produção e transporte de Hidrogênio
Características	Zero emissão Alta eficiência energética Independência de óleos brutos Baixo Alcance Alto custo inicial Comercialmente Disponível	Baixa Emissão Alta economia de combustível Grande alcance Dependência de óleos brutos Alto custo de aquisição Comercialmente Disponível	Zero emissão Alta eficiência energética Independência de óleos brutos Alcance satisfatório Alto custo inicial Em desenvolvimento
Maiores Problemas	Bateria e gestão de Carga Instalações de Recarga	Gestão, otimização e controle de múltiplas fontes de energia Tamanho da Bateria e Gestão	Custo da célula de combustível Ciclo de vida e Confiabilidade Infraestrutura de Hidrogênio

6. Modo de frenagem regenerativa.

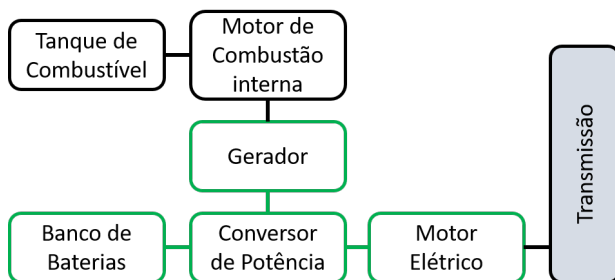


Fig. 7. Topologia HEV Série. Adaptado de [11]

E. Topologia Paralela

Nesta topologia o ICE e o EM estão acoplados ao eixo principal do veículo por meio de duas embreagens. Conforme mostrada na Figura 8. Desta forma, permite que a energia para tracionar as rodas seja fornecida somente pelo ICE, somente pelo EM ou por ambos. Diferente da topologia série, nesta é dispensado o uso de um gerador por conta do EM pode atuar como tal. Outra vantagem é que o as máquinas podem ter um dimensionamento menor e ser extraído o mesmo desempenho, visto que nesta topologia é permitido somar as duas potências [6]. Assim ela pode operar em seis diferentes modos:

1. EM sozinho: ESS fornece energia ao EM.
2. ICE sozinho: ICE traciona o veículo diretamente.
3. Modo Combinado: Tanto o ICE quanto o ESS fornecem energia de tração.

4. Modo Divisor de potência: O ICE fornece energia para tracionar o veículo e carregar as baterias (EM atua como gerador).

5. Modo de carregamento da bateria.

6. Modo de frenagem regenerativa.

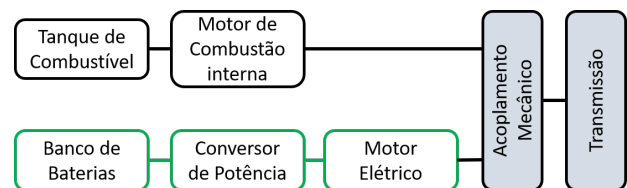


Fig. 8. Topologia HEV Paralela. Adaptado de [11]

F. Topologia Série-Paralela

Mostrada na Figura 9. Esta topologia Incorpora as características das topologias anteriores citadas. Tem a vantagem de um menor tamanho de EM comparado à Série e menor ICE comparado à Paralela. Outra vantagem é a eficiência tanto em baixas rotações quanto em altas rotações. Contudo ela é relativamente mais complexa e cara [6].

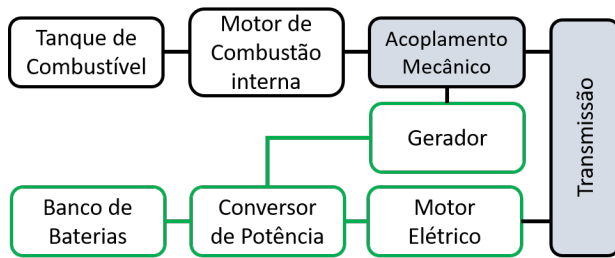


Fig. 9. Topologia HEV Mista. Adaptado de [11]

G. Topologia Complexa

Mostrada na Figura 10. Assim como o nome sugere, é uma topologia complexa. Ela se assemelha à Série-Paralela com a principal diferença de empregar um conversor bidirecional. Esse conversor provém modos mais versáteis de operação combinando o ICE com os dois EMs. E assim como à topologia Série-Paralela, ela é mais cara [6].

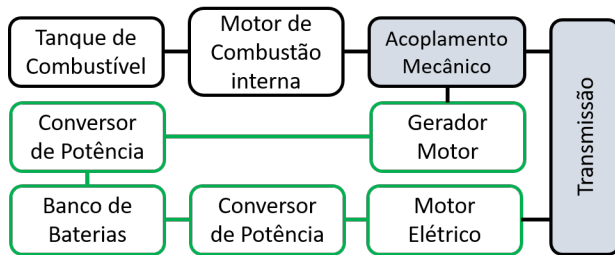


Fig. 10. Topologia HEV Complexa. Adaptado de [11]

H. Conversores

Os sistemas elétricos dos EVs e HEVs envolvem diferentes níveis de potência e tensão, por exemplo 12 V e 450 V. Isso requer que a incorporação da eletrônica de potência em vários níveis [12]. Desta forma, é esperado que haja uma grande quantidade de conversores em um EV. Estes conversores podem ser classificados como unidirecionais e bidirecionais. Ambos os grupos podem ser dos tipos cc-cc e cc-ca. Os conversores cc-cc unidirecionais são empregados para fazer a alimentação de cargas auxiliares de baixa potência como sensores, iluminações, sistemas de entretenimento dentre outras. Eles também são empregados no carregador interno (OBC) para adequar o nível de tensão da rede para o barramento interno de alta tensão. Os conversores cc-ca, em sua maioria bidirecionais, são responsáveis por aumentar o controle, performance e eficiência dos HEVs. Esse tipo de conversor transporta o fluxo de potência em ambas as direções, por exemplo das baterias para roda e das rodas para as baterias durante a frenagem regenerativa [3]. Devido ao tamanho deste tema, não será abordado com maior profundidade.

I. Armazenamento de Energia

Em relação a viabilidade dos HEVs, o Sistema de Armazenamento de Energia (ESS) talvez possa ser considerado como o mais importante e também o mais caro, especialmente

em BEVs [13]. O ESS pode ser simples ou Híbrido. O ESS simples é formado apenas por um banco de baterias, e esta tecnologia pode ser considerada em sua infância. Embora tenha evoluído muito, espera-se que ela continue a amadurecer. Com isso, deve trazer aprimoramentos como a redução do tamanho e preço e aumentando a capacidade. Um ESS Híbrido, pode ser composto pelo banco de baterias em conjunto com supercapacitores, que trazem o benefício da alta velocidade de carga e descarga, aumentando a vida útil da bateria. Outro ESS Híbrido utiliza novamente o banco de baterias em conjunto com um sistema mecânico de armazenamento de energia cinética. Neste sistema, a energia mecânica da frenagem é armazenada em um volante de inércia, e pode ser utilizada novamente durante as acelerações [14]. Com isso, percebe-se que a bateria ainda é o componente central do ESS. Os tipos mais comuns de baterias são: Chumbo Ácido, Íon de Lítio (Li-ion), Polímero de Lítio (Li-Po), Níquel hidreto metálico (NiMH), Níquel Cádimo (Ni-Cd). Tratando de EVs é importante que se leve em consideração, dentre outros fatores, a quantidade de ciclos suportadas pela bateria e a energia específica. Energia específica é a razão da quantidade de energia da bateria carregada pelo seu peso [1]. Na Tabela II é feita uma comparação destes diferentes tipos de baterias.

TABELA II
Tipos de Baterias

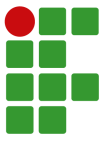
Tipo	Energia Específica (Wh/kg)	Ciclos
Chumbo-Ácido	33-42	500-800
Ni-Cd	40-60	2000
Ni-MH	60-120	500-1000
Li-ion	100-265	400-1200
Li-Po	100-265	2000

Além destes tipos de baterias que já são utilizadas comercialmente existem outras tecnologias que estão sendo exploradas. Visto que as tecnologias atuais possuem limitações de preço, tamanho e ciclos de carga, existem pesquisas de configurações de baterias utilizando outros materiais como; grafeno, Alumínio-ar dentre outros [15].

J. Motores elétricos

Os motores e geradores elétricos são amplamente utilizados em veículos e começaram a ser implantados em automóveis muito antes do desenvolvimento dos modernos EVs. Nos carros eles são empregados em; bombas d'água, partida elétrica, ventoinhas, vidros elétricos, tetos solares, alternadores, ventiladores do ar condicionado, limpadores de para-brisa dentre outras funções. Normalmente encontra-se mais de dez motores elétricos em qualquer veículo moderno [13].

Nos EVs, além dos motores auxiliares citados existe ainda o motor elétrico de tração, responsável por gerar a energia mecânica necessária para o deslocamento do veículo. Estes motores também acabam atuando como geradores, por isso são normalmente chamados de máquinas elétricas. As máquinas elétricas empregadas em EVs podem ser classificadas em



dois tipos, as avançadas convencionais e as emergentes. As máquinas avançadas convencionais se referem a máquinas com avançados critérios de projeto para aplicações em EVs, porém com o princípio de funcionamento muito bem difundido. São exemplos de máquinas avançadas convencionais: Máquinas de Indução (IMs), Máquinas de relutância variável (SRMs), Máquinas síncronas de ímãs permanentes (PMSMs) e Máquinas de relutância síncronas assistidas por ímãs permanentes (PMA-SynRMs). Já as máquina emergentes se referem a máquinas com um desenvolvimento relevante recente. Estas máquinas abrangem: Estator de Ímãs permanentes, Fluxo Controlável e máquinas multi-portas [16]. A seguir será feita uma breve descrição das máquinas que se enquadram como avançadas convencionais. Um tipo de máquina multi-portas será apresentada na seção IV.

K. Máquinas de Indução (IMs)

São formadas pelos enrolamentos de excitação no estator e o enrolamento de armadura no rotor. Mostrada na Figura 11. O enrolamento de armadura do rotor é normalmente feito de alumínio fundido e é chamado de gaiola de esquilo. Para a aplicações em EVs podem sofrer modificações no material usado. Esse tipo de máquina equipa modelos de EVs comerciais como Tesla Model 3 e Model S, BMW i3, Mercedes-Benz Classe B Electric Drive, Toyota RAV4 e Nissan Leaf. Características das IMs [16].

1. Tem um menor custo de construção e manutenção comparado às PMSMs.
2. A ausência de Ímãs Permanentes aumenta a robustez e a confiabilidade, permitindo que seja utilizada em ambientes severos.
3. IMs trifásicas possuem um torque de partida que é indisponível em máquinas síncronas. Assim é garantida uma boa performance de partida em VEs.
4. IMs podem alcançar alta eficiência, claramente não tão alta como nas PMSMs. Mas isso pode diminuir as perdas do *powerdrive* e aumentar a eficiência do veículo inteiro.
5. É dificultoso ter um controle preciso da velocidade.

L. Máquinas de relutância variável (SRMs)

Estas máquinas receberam grandes interesses para aplicações em HEVs devido a vantagens nesta aplicação. Mostrada na Figura 11. São de fabricação simples e robusta, capazes de operar em altas rotações e possuem a maior faixa de velocidade com potência constante do que qualquer outro motor. Contudo possuem baixa densidade de torque e baixa eficiência quando comparadas a outras máquinas utilizadas em EVs, porém essas deficiências são compensadas pela faixa de velocidade estendida com potência constante [3]. Esse tipo de máquina é empregada em pequenos EVs como carros de golf e patinetes [16]. Características das SRMs [16].

1. Não existe enrolamentos ou ímãs permanentes no rotor. Assim, o rotor se torna uma estrutura simples, robusta e confiável.

2. O acionamento de alta velocidade pode ser alcançado acima de 10.000 rpm com um nível de potência de tração específico.
3. As SRM de alta velocidade têm a vantagem de alta densidade de potência, questão importante para motores de tração em EVs.
4. Possui maior tolerância a falhas mecânicas do rotor. Isso melhora a segurança para aplicações em EVs.
5. Há um grande *ripple* de torque e vibração eletromagnética no SRM. Isso pode causar poluição sonora para motoristas e passageiros.

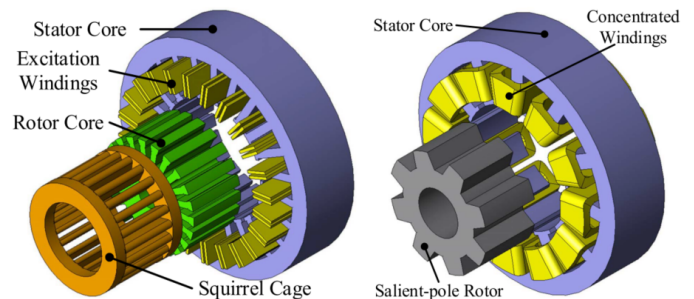


Fig. 11. Dir. Máquina de Indução (IM) e Esq. Máquina de Relutância Variável (SRM). Adaptado de [16]

M. Máquinas síncronas de ímãs permanentes (PMSMs)

Com o rápido desenvolvimento de materiais magnéticos utilizando elementos químicos de terras raras, estes tipos de máquinas se tornaram muito desejados no projeto de EVs e HEVs. Possuem alta densidade de potência e eficiência, porém podem sofrer desmagnetização. Equipa os modelos comerciais de EVs como Chevrolet Bolt, Ford Focus Electric, Hyundai Ioniq, and Jaguar I-Pace. Características das PMSMs [16]. A topologia de uma PMSMs pode ser observada na Figura 12.

1. Ímãs magneticamente fortes, fornecem um fluxo residual para as bobinas, o que aumenta amplamente o desempenho geral da máquina.
2. Possuem a maior densidade de torque, potência e eficiência.
3. Técnica do enfraquecimento de fluxo é utilizada no acionamento em altas rotações, aumentando o risco da desmagnetização. Com isso estratégias de controle complexas devem ser implementadas em seus controladores.
4. Ímãs de terras raras sofrem com as perdas por corrente de Foucault, risco de desmagnetização e falha mecânica.
5. A vibração pode ser um fator significativo.

N. Máquinas de relutância síncronas assistidas por ímãs permanentes (PMA-SynRMs)

Nesse tipo de máquina é combinada a vantagem do torque de relutância presente na SRM com a adição de ímãs permanentes

(comuns) melhorando seu desempenho. Como pode ser observado na Figura 12, esse tipo de máquina não possui polos salientes logo a relutância é feita pela geometria interna do rotor, neste local também são instalados os imãs permanentes. Características das PMA-SymRMs [16].

1. A utilização do torque de relutância reduz a quantidade de material magnético ativo, reduzindo também o custo da máquina.
2. Menos imãs de terras raras aumentam a confiabilidade do sistema, através da redução de perdas, baixo risco de superaquecimento e alta força do rotor.
3. Enfraquecimento de fluxo e acionamento em alta velocidade pode ser facilmente realizado
4. Projeto e otimização das barreiras de ar no rotor tendem a ser complexas e demoradas
5. Estão de acordo com um futuro ecologicamente correto e um design sustentável.

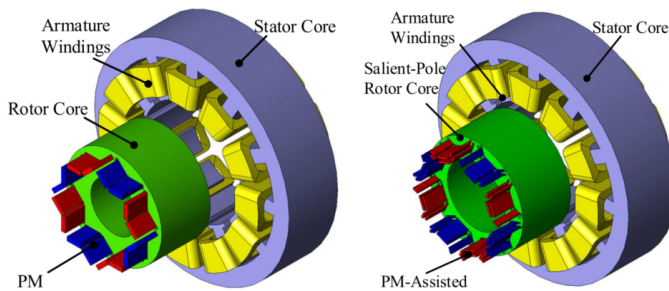


Fig. 12. Dir. Máquina Síncrona de Imã Permanente (PMSM) e Esq. Máquinas de Relutância Síncronas assistidas por Imãs Permanentes (PMA-SynRMs). Adaptado de [16]

III. MÁQUINAS DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL (SRM)

As máquinas de relutância variável estão se tornando cada vez mais uma escolha para aplicações em EVs e HEVs. Essas recentes avanços nas pesquisas em máquinas de relutância então diretamente ligados ao crescente número de EVs em circulação, sua construção simples e a dispensa de Imãs permanentes. Isso torna ela uma substituta de baixo custo para as PMs. O fato de não utilizar Imãs no rotor e nem enrolamento, permite que ela seja aplicada a condições de alta temperatura e funcione em altas rotações [17]. Nesta seção será descrito o princípio de funcionamento de uma máquina de relutância

A. Princípio de funcionamento

Possivelmente, a SRM é a mais simples das máquinas. Ela é constituída por um estator com enrolamentos de excitação e um rotor magnético com saliências [18]. O conjugado de relutância é o conjugado induzido em um objeto de ferro na presença de um campo magnético externo, levando o objeto a se alinhar com este campo. Esse conjugado ocorre pois o campo magnético externo induz um campo interno no ferro do objeto. Desta forma surge

um conjugado que leva o objeto girar até se alinhar com o campo externo [19] [18].

Um exemplo de uma SRM de polos duplamente salientes é mostrado na Figura 13. É classificada como duplamente saliente pois ambos os polos, de rotor e estator, são salientes. Essa é uma máquina bifásica projetada quatro polos de estator e dois polos de rotor, pode-se chamar essa configuração de 4/2.

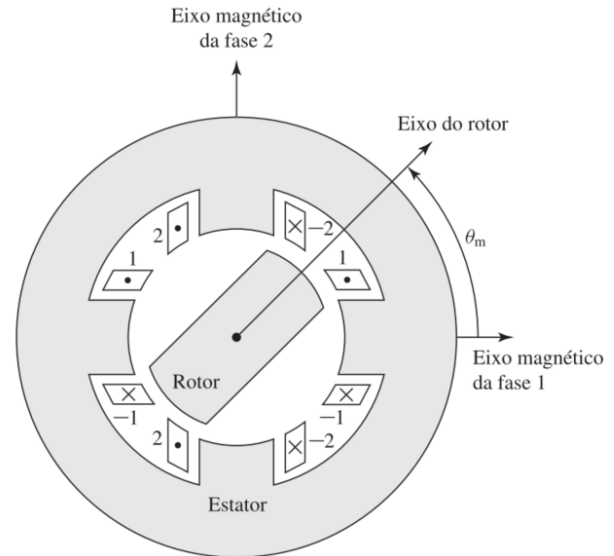


Fig. 13. SRM bifásica de polos duplamente salientes. Adaptado de [18]

Para que seja possível a criação do conjugado de relutância, as SRMs sempre são projetadas com polos salientes para que haja uma variação da relutância durante o seu funcionamento. Devido a isso, é importante observar também que a indutância de fase varia em função da posição do rotor, conforme a Figura 14. Nota-se que a indutância de uma fase é máxima quando o eixo do rotor está alinhado com o eixo magnético daquela fase e é mínima quando os dois eixos estão perpendiculares [18].

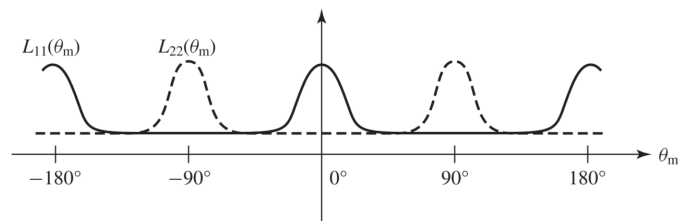


Fig. 14. Gráfico da indutância em função da posição da SRM da Figura 13. Adaptado de [18]

Assim, para manter uma SRM em funcionamento as fases precisam ser acionadas sequencialmente. Deste modo o rotor irá girar variando o ângulo a cada passo de acordo com a quantidade de polos no estator. A Equação 1 descreve o Conjugado mecânico da SRM ilustrada na Figura 13 de acordo com [18].

$$T_{mec} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}(\Theta_m)}{d\Theta_m} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{11}(\Theta_m - 90^\circ)}{d\Theta_m} \quad (1)$$

Pode-se notar que o Conjugado varia em função da Indutância de Fase, esta que varia em função da posição conforme já mencionado. Assim, quando o rotor estiver alinhado com a fase acionada, o Conjugado será mínimo. Neste momento a fase em questão deve ser desligada e acionada a próxima. Agora o conjugado é máximo, e o rotor irá girar até se alinhar com esta outra fase. Novamente o conjugado será mínimo. Para manter o movimento rotativo, esta fase deve ser desligada, a acionada novamente a primeira fase. Logo o rotor irá girar, se alinhando novamente com esta fase. Desse modo constatada a forma que o SRM se mantém em movimento em relação ao acionamento das fases. Vale ressaltar que nesse tipo de máquina deve ser utilizado um controlador eletrônico para fazer o acionamento das fases, e este controlador precisa de uma realimentação a todo instante da posição do rotor.

IV. MÁQUINAS DE DUPLO ROTOR

Partindo de um conceito mais amplo, as máquinas de duplo rotor fazem parte de uma categoria emergente de máquinas elétricas, as máquinas multi-portas. Esse tipo de máquina, diferente das máquinas comuns, é formado por múltiplas portas elétricas (Conjunto de enrolamentos que permitem um fluxo de potencia bidirecional) e múltiplas portas mecânicas (Eixos). O objetivo das máquinas multi-portas é oferecer uma maneira compacta, flexível, e altamente eficiente de converter e/ou transferir energia entre suas diferentes portas [20].

As Máquinas de duplo rotor se referem a máquinas elétricas que empregam dois rotores concêntricos e dois estatores que são combinados mecanicamente e possivelmente magneticamente [21].

A. Revisão de Aplicações

De acordo com pesquisas feitas, pode-se afirmar que máquinas de duplo rotor são utilizadas em diferentes aplicações tais como: Motores de Indução, Motores de Imãs permanentes, Geradores. Podem também substituir o motor do condensador e evaporador em um sistema de refrigeração [21]. SRM com duplo rotor para aplicação em máquina de lavar roupas é mencionado em [22]. SRM com duplo rotor com aplicação in-wheel em EVs é estudada em [23]. Novo modelo de SRM com duplo rotor e duplo estator para aplicação em EVs é proposto em [24]. É proposto o "Transdutor de energia de quatro quadrantes", uma Máquina Elétrica de duplo rotor com aplicação em EVs. A Figura 15 traz a topologia de um veículo com a aplicação desta máquina que ficara conhecida como "Transmissão elétrica variável"(EVT) [25].

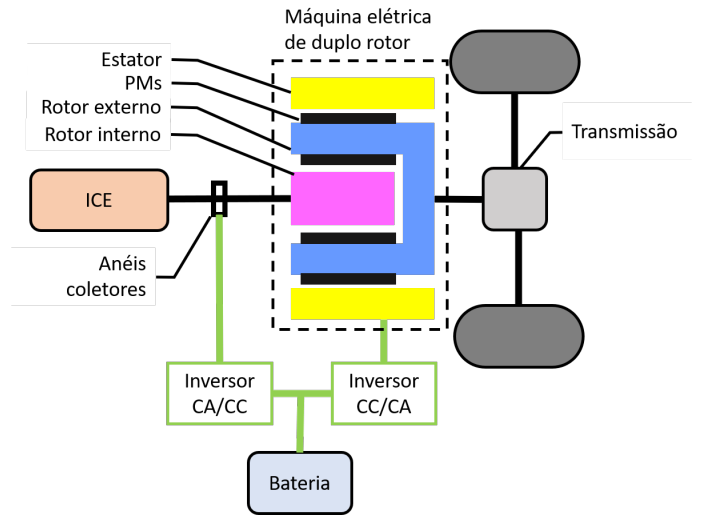


Fig. 15. Topologia da Transmissão Elétrica Variável. Adaptado de [25]

É proposto também uma SRM com estator compartilhado e duplo rotor segmentado em [21] e [26]. Estes últimos trabalhos serão revistos com maior atenção na seção seguinte. Verifica-se que a maioria das referências encontradas nesta área estão voltadas para a aplicações em EVs.

B. Aspecto Construtivo

Uma SRM com duplo rotor, pode ser projetada teoricamente de 16 diferentes formas, levando em consideração a combinação da posição dos rotores e estatores. No entanto a máquina que será estudada se trata especificamente de uma Máquina de relutância variável com duplo rotor segmentado e Estator central Bobinado (*DSRSRM with Wound Central Stator*). Na Figura 16, pode-se observar alguns aspectos importantes dessa máquina: Ela possui um rotor externo, um rotor interno e o estator fica entre estes dois rotores. Os polos de ambos os rotores são segmentados. O estator é compartilhado para ambas as máquinas.

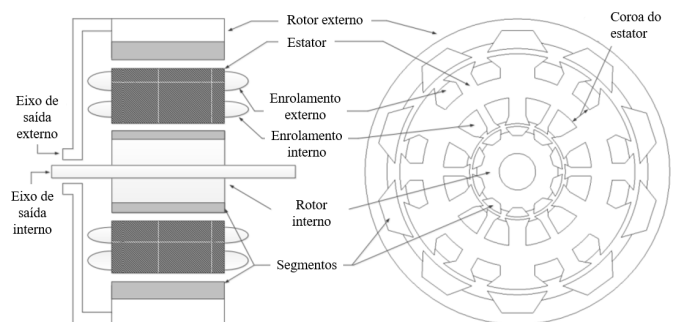


Fig. 16. DSRSRM com estator central bobinado. Adaptado de [26]

V. ESTUDO DE CASO

Nesta seção, será apresentada uma comprovação de resultados obtidos com a simulação da máquina projetada em [26]. Nesta tese, que também é apresentada no artigo [21], o autor propõe um novo tipo de SRM de duplo rotor, a DRSRSM mostrada na Figura 16. Esta proposta visa reduzir o tamanho e aumentar a performance em relação a uma máquina existente. Para atingir esses objetivos o autor propõe duas mudanças principais em relação a máquina de referência. A primeira é o uso de rotores segmentados e a segunda é o compartilhamento da coroa do estator para as duas máquinas. À partir disso é feito o projeto da nova máquina levando em conta as especificações da máquina de referência. Após isso foram feitas várias simulações em software de elementos finitos, afim de otimizar as medidas da máquina. Depois de feitas as simulações essa máquina fora fabricada, e testada. As conclusões deste trabalho mostram que houve uma redução de 40% no volume total da máquina, em relação à máquina de referência, sem comprometer a performance.

Dentre as simulações feitas pelo autor estão a avaliação do impacto do compartilhamento do estator por meio da verificação das linhas de fluxo. Também foi analisado o acoplamento magnético entre os dois estatores, através da diferença de indutância e diferença de torque. São essas duas avaliações que vão ser realizadas, neste trabalho, a fim de comprovar os resultados obtidos pelo autor.

A. Projeto da máquina

As restrições de projeto da máquina estão mostradas na Tabela III e os requisitos de saída estão na Tabela IV [26].

TABELA III
Restrições de projeto da DRSRSM

Parâmetro	Valor
Densidade máxima de fluxo entre os dentes do estator	1.8T
Comprimento total menor que	160mm
Diâmetro total menor que	302mm
Corrente de fase de pico (externa) menor que	5A
Corrente de fase de pico (interna) menor que	6A
Preenchimento da ranhura (externa) não superior a	39%
Preenchimento da ranhura (interna) não superior a	35,5%
Densidade de corrente RMS menor que	5A/mm ²

TABELA IV
Requisitos de saída da DRSRSM

Máquina Externa			Máquina Interna		
Veloc. (RPM)	Torque (Nm)	Eficiência %	Veloc. (RPM)	Torque (Nm)	Eficiência %
500	8	82.0	2000	2	83.0
750	6.57	82.0	2400	1.81	84.2
837	5.57	77.5	3000	1.63	81.0
1000	3.57	78.0	4000	1.47	89.0

Com posse desses dados o autor revela algumas dimensões gerais fixas, e outras com várias opções de otimização. Devido a isso algumas grandezas foram estimadas com base em resultados, pois não estava explícito qual dimensão o autor utilizou. Assim, a Tabela V exhibe dimensões usadas no desenho da máquina.

TABELA V
Dimensões da DRSRSM

Símbolo do Parâmetro	Descrição	Máquina Interna	Máquina Externa
H1	Altura do dente do estator	17mm	19mm
H2	Altura do segmento do rotor	5mm	10,5mm
H3	Espes. do garfo do estator	15mm	15mm
W1	Larg. do pólo de fase do estator	10mm	21mm
W2	Larg. do interpolo do estator	5mm	10,5mm
D	Diâm. do entreferro	80mm	182mm
a1	Larg. do pólo de fase do estator	32°	33,5°
a2	Larg. do interpolo do estator	20°	21,5°
a3	Larg. do segmento do rotor	32°	33,5°
a4	Âng. do pólo da fase do estator	31°	26,5°
a5	Âng. do interpolo do estator	31°	26,5°
a6	Âng. do segmento do rotor	31°	26,5°
Lstk	Comprimento do pacote	50mm	50mm
Lg	Comprimento do entreferro	0,3mm	0,3mm

As identificações das medidas da máquina são mostradas na Figura 17.

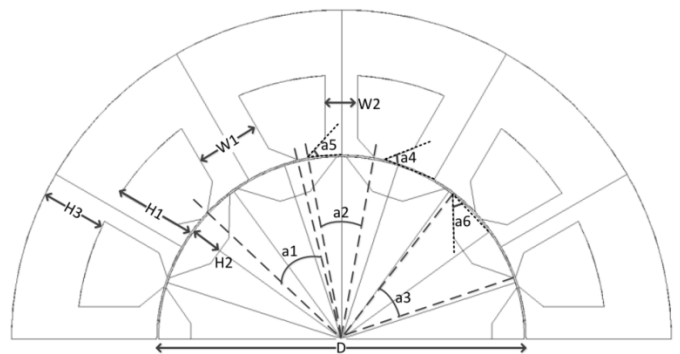


Fig. 17. Identificações das medidas da DRSRSM. Adaptado de [26]

Tendo em mãos o dimensional das máquinas, elas foram desenhadas no *software* AutoCad, Figura 18. Como um dos objetivos era avaliar o acoplamento magnético entre a máquinas externa e interna, cada máquina foi desenhada isoladamente e por fim a máquina completa, resultando em três máquinas. De acordo com o autor, é muito comum em projetos de máquinas de duplo rotor, trabalhar com cada máquina separada, se o perfil assim permitir. Nesse caso, ele simula as duas situações (máquina separada e máquina completa) e confirma que é possível trabalhar com cada máquina isoladamente.

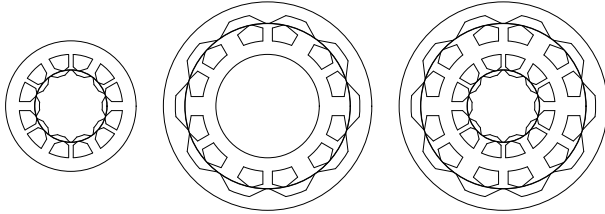
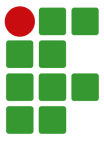


Fig. 18. Máquina Interna, Máquina Externa e Máquina Completa.
Próprio Autor.

Depois da etapa dos desenhos, iniciaram-se as simulações utilizando o *software* de cálculo magnético por elementos finitos FEMM 4.2 em conjunto com o *software* de cálculo numérico GNU Octave. Para fim de simulações o material magnético usado foi mesmo indicado pelo autor, Aço silício M15 *Steel*. O material não magnético foi usado Titânio. As informações a respeito da bobinagem estão mostradas na Tabela VI. Estas simulações foram feitas na seguinte sequência.

1. Foram obtidos os valores de Torque e Indutância da fase A na Máquina Interna rotacionando o rotor Interno de 0 a 36° com incremento de 1°.
2. Foram obtidos os valores de Torque e Indutância da fase A na Máquina Externa rotacionando o rotor Externo de 0 a 36° com incremento de 1°.
3. Foram obtidos os valores de Torque e Indutância da fase A interna e externa na Máquina Completa rotacionando o rotor Interno de 0 a 36° com incremento de 1°. E Para cada grau rotacionado na máquina Interna fora rotacionando o rotor externo de 0 a 36°. Resultando em 1369 pontos.
4. Foi feito o mesmo procedimento do passo anterior, porém agora as fases acionadas são a fase A da máquina interna e a fase B da máquina externa.

TABELA VI
Dimensões da DSRSRM

	Bitola do fio	Area do fio (mm ²)	n° de fios	n° de espiras por fase
Maq. Interna	#22	0,32	2	292
Maq. Externa	#22	0,32	2	480

B. Análise dos Resultados

Os primeiros resultados mostrados nas Figuras 19, 20, 21 e 22. Estes são referentes a avaliação do impacto do compartilhamento da coroa do estator por meio da verificação das linhas de fluxo. Esta simulação visa analisar o fluxo magnético no estator compartilhado (máquina completa).

Percebe-se que essas linhas são muito parecidas quando comparamos as máquinas isoladas, Figuras 19 e 20, com a máquina completa na Figura 21. Isso indica que o compartilhamento da coroa do estator, neste caso, tem impactos insignificantes. É importante notar também que quando as fases adjacentes das máquinas são excitadas, Figura 22, a direção dos fluxos das máquinas internas e externas são opostas devido ao enrolamento de cada fase. Isso faz com que na parte do estator que é compartilhada apareça pontos com uma densidade de próxima de zero. Quando as mesmas fases estão acionadas, situação da Figura 21, a máquina interna e a máquina externa utilizam a mesma porção da coroa do estator. Novamente os fluxos estão em direções opostas, resultando em uma baixa densidade de fluxo nesta região. Outro fator importante a se observar é a semelhança dos resultados obtidos, com os resultados obtidos por [26], que são mostrados em anexo. O Anexo I é referente a máquina completa com acionamento das mesmas fases. O Anexo II traz os resultados referentes ao acionamento de fases opostas. Vale ressaltar que a densidade de fluxo para ambos os casos ficaram parecidas.

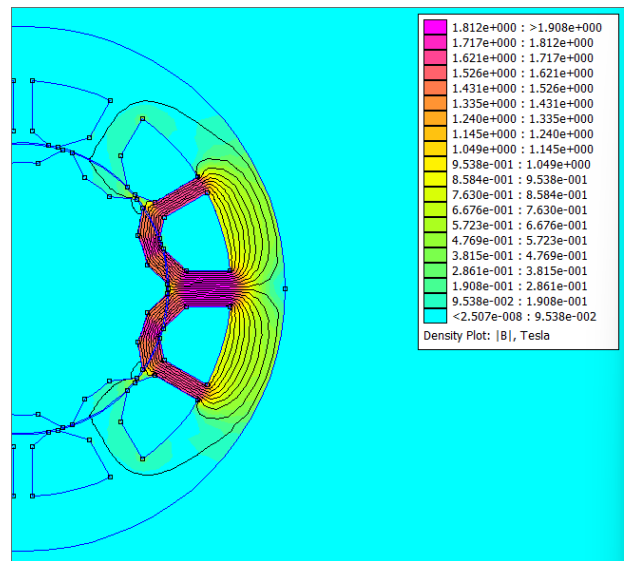


Fig. 19. Densidade de fluxo Magnético na Máquina Interna isolada.
Próprio autor.

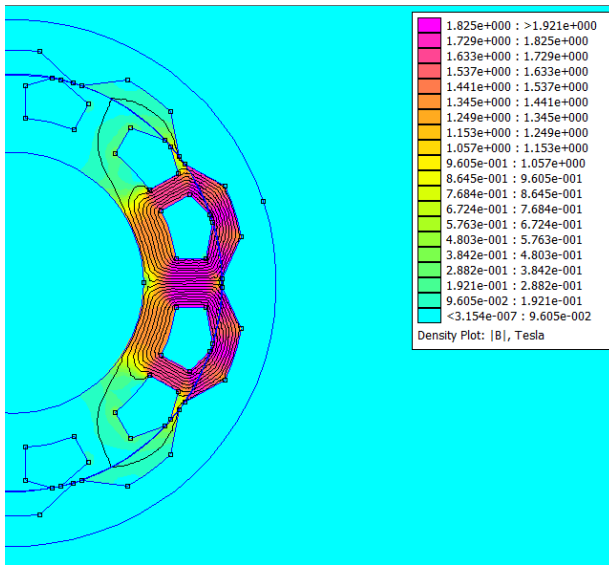


Fig. 20. Densidade de fluxo Magnético na Máquina Externa isolada. Próprio autor.

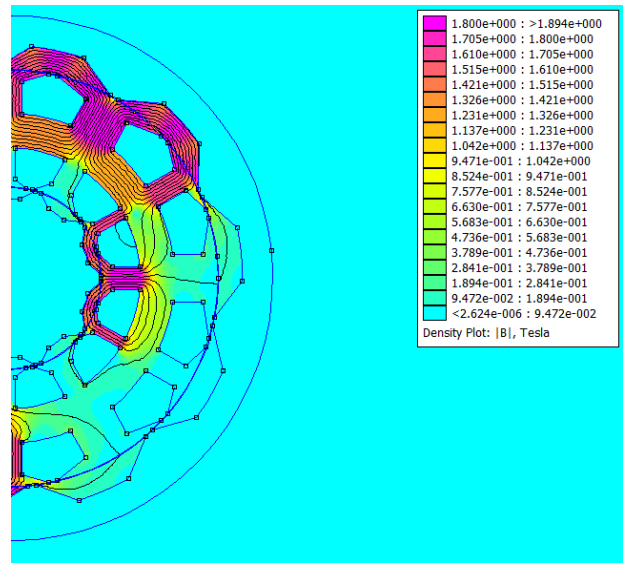


Fig. 22. Densidade de fluxo Magnético na Máquina Completa com as fases adjacentes acionadas. Próprio autor.

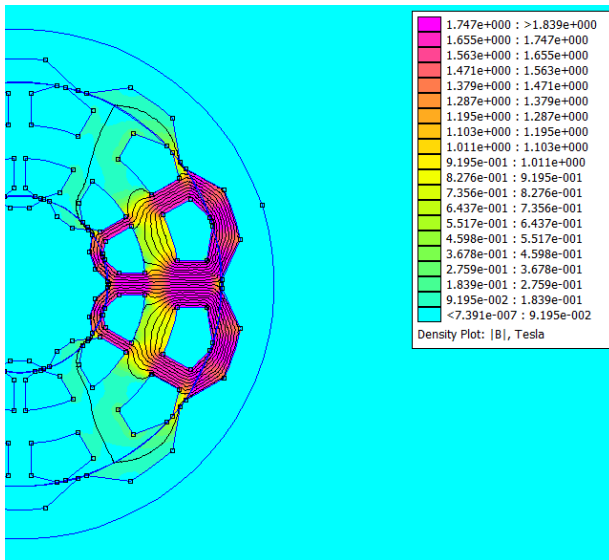


Fig. 21. Densidade de fluxo Magnético na Máquina Completa com as mesmas fases acionadas. Próprio autor.

Os próximos resultados que são mostrados nas Figuras 27 e 28, são referentes ao acoplamento magnético entre os dois estatores, através da diferença de indutância e diferença de Torque. Resumidamente o objetivo desta análise é verificar o quanto a posição de uma das máquinas interfere na outra. Por exemplo, primeiro foram obtidos os valores do torque em relação à posição da máquina interna isolada, plotados na Figura 23.

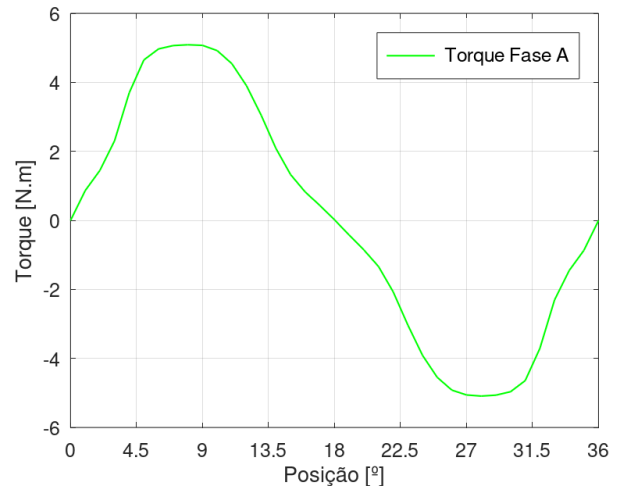


Fig. 23. Torque máquina interna isolada Fase A acionada

Depois foram obtidos os valores do torque em relação à posição da máquina interna completa, para cada posição de cada rotor, mostrados na Figura 24.

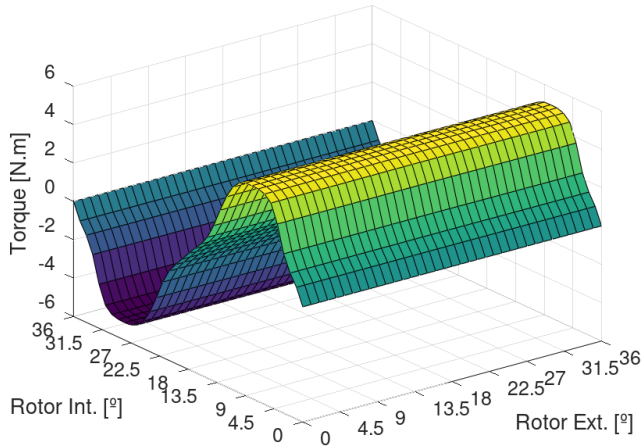
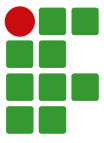


Fig. 24. Torque máquina interna completa Fases A acionadas

Então foi calculada a diferença percentual dessa ultima medida em relação à máquina isolada. Obtendo, desta maneira, os resultados de diferença percentual de torque para cada rotor, nos casos de acionamento de mesmas fases e fases adjacentes.

Da mesma forma, esse procedimento se repetiu para a análise de indutância. Primeiramente foram obtidos os valores do torque em relação à posição da máquina interna isolada, plotados na Figura 25.

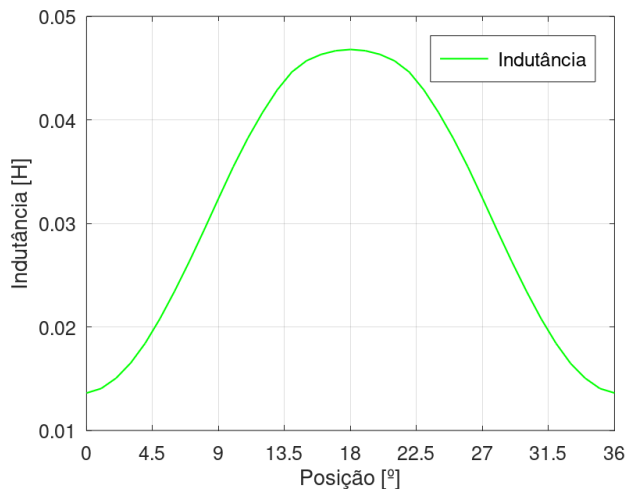


Fig. 25. Indutância máquina interna isolada Fase A acionada

Depois foram obtidos os valores do indutância em relação à posição da máquina interna completa, para cada posição de cada rotor 26.

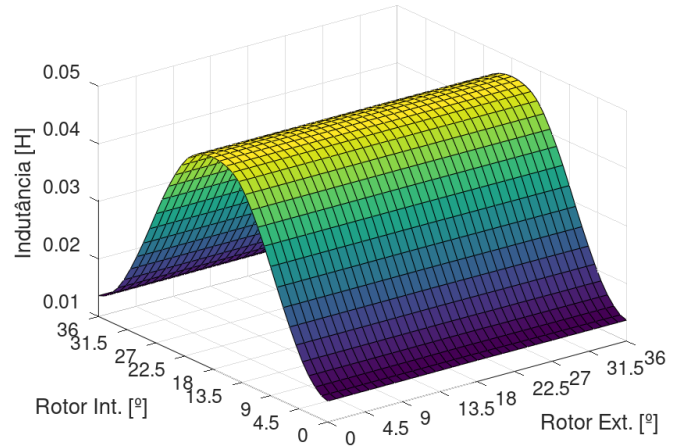


Fig. 26. Indutância máquina interna completa Fases A acionadas

Novamente, foi calculada a diferença percentual dessa ultima medida em relação à máquina isolada. Obtendo assim, os resultados de diferença percentual de indutância para cada rotor, nos casos de acionamento de mesmas fases e fases adjacentes. Como já mencionado, os resultados dessas simulações então mostrados nas Figuras 27 e 28.

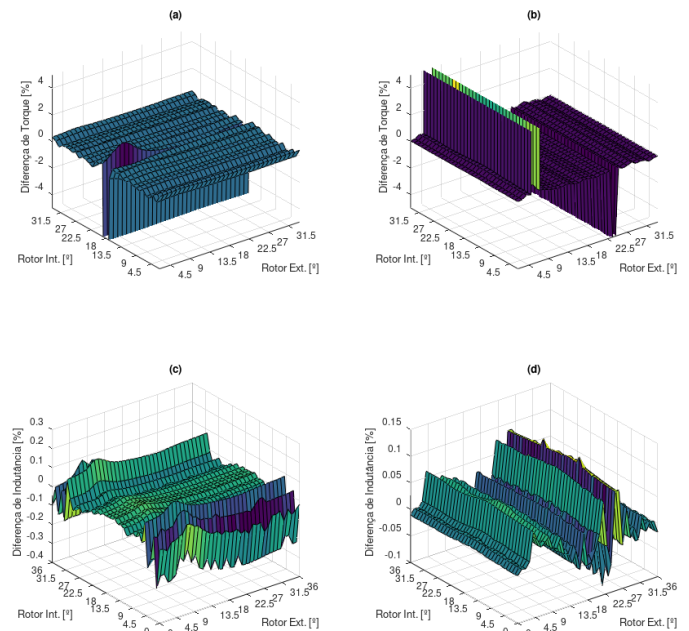


Fig. 27. Efeito do acoplamento com as fases adjacentes acionadas; (a) no Torque do rotor interno, (b) no Torque do rotor externo, (c) na Indutância do rotor Interno e (d) na Indutância do rotor Externo.

Próprio autor.

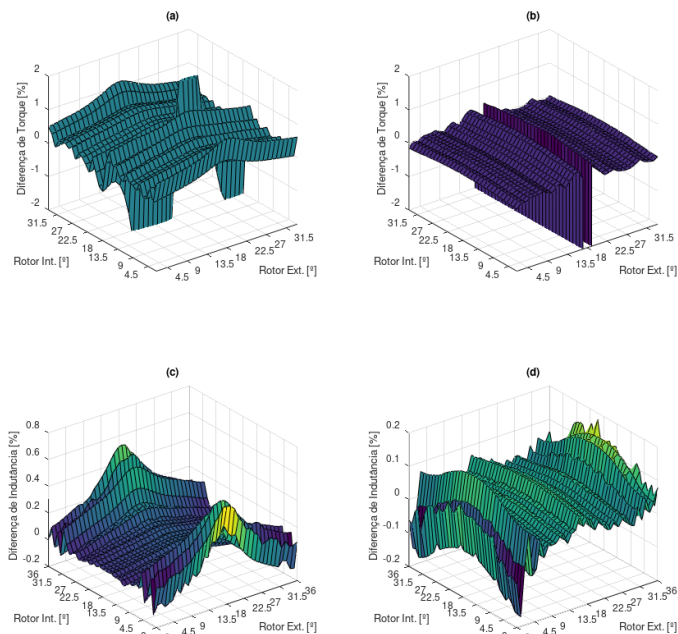


Fig. 28. Efeito do acoplamento com as mesmas fases acionadas; (a) no Torque do rotor interno, (b) no Torque do rotor externo, (c) na Indutância do rotor Interno e (d) na Indutância do rotor Externo. Próprio autor.

Observando os resultados pode-se concluir que a diferença de indutância em todos os casos ficaram abaixo da 1% e a diferença do torque ficaram abaixo dos 2%. Novamente os resultados ficaram muito semelhantes aos obtidos por [26] conforme pode ser observado nos Anexos III e IV. Apenas a diferença de torque da máquina interna que apresentou leves discrepâncias. Contudo, Isso indica que a característica magnética da máquina é quase invariável às mudanças na posição do rotor da outra máquina. Logo o acoplamento magnético entre essas duas máquinas é insignificante. E como essas diferenças entre os modelos isolados e a máquina completa são tão pequenas, pode-se confiar nos modelos isolados para fins de projeto e análise.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível conhecer parte do histórico do uso de Veículos Elétricos. Observou-se que esse tipo de veículo foi muito utilizados desde o século XIX, porém com o aumento na exploração do petróleo eles foram perdendo espaço para os veículos com motores de combustão interna. Contudo, nas décadas recentes esse os EVs voltaram a ganhar notoriedade. Essa classe de veículos também não se limita mais somente aos carros para transporte de passageiros, são também empregados na indústria, construção, mineração, agricultura, naval e aérea. Esse grande avanço se deve à questões tecnológicas políticas, e principalmente ambientais.

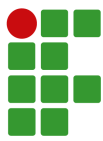
Assim, esse trabalho buscou explicar as topologias de EVs que existem atualmente mostrando suas características e

comparando umas com as outras. Avançando um pouco mais foi brevemente introduzido os conceitos dos seus componentes como Conversores e o Armazenamento de Energia. E então tratou do principal componente dos EVs, os motores elétricos. Com relação ao motores foi constatado que os motores de ímãs permanentes, embora possuam a maior eficiência e potência específica, estão perdendo espaço para novas tecnologias mais baratas como os motores de Relutância. Ainda a respeito dos motores com este trabalho foi possível entender o funcionamento de uma motor de relutância simples. Com esta base, pode-se ter um melhor entendimento das máquinas de múltiplos rotores, esta que também é uma tecnologia que vem sendo cada vez mais explorada.

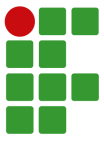
Por fim foi feita uma explanação de uma proposta de máquina de relutância variável com duplo rotor segmentado. Este projeto proposto visa diminuir em 40% o volume da máquina, em relação a uma máquina convencional, sem comprometer a performance. Após isso foram comprovadas duas análises feitas pelo autor dessa máquina. A primeira é referente a densidade de fluxo no estator compartilhado, e a segunda é referente ao acoplamento magnético entre essas duas máquinas que compõe uma máquina de duplo rotor. Os resultados obtidos foram muito próximos aos obtidos pelo autor. Como propostas futuras ficam a simulação do acionamento completo dessa máquina e também a análise do *ripple* de torque de cada um dos rotores.

REFERÊNCIAS

- [1] S. S. Refaat, O. Ellabban, S. Bayhan, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg, M. M. Begovic, *Smart Grid and Enabling Technologies*, John Wiley & Sons, 2021.
- [2] S. Saponara, C. H. Lee, N. X. Wang, J. L. Kirtley, “Electric drives and power chargers: Recent solutions to improve performance and energy efficiency for hybrid and fully electric vehicles”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 1, pp. 73–83, 2020.
- [3] M. Ehsani, K. V. Singh, H. O. Bansal, R. T. Mehrjardi, “State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, 2021.
- [4] T. Jahns, “Getting rare-earth magnets out of EV traction machines: A review of the many approaches being pursued to minimize or eliminate rare-earth magnets from future EV drivetrains”, *IEEE Electrification Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 6–18, 2017.
- [5] M. A. Masrur, “Hybrid and Electric Vehicle (HEV/EV) Technologies for Off-Road Applications”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1077–1093, 2020.
- [6] C. C. Chan, “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, 2007.
- [7] P. Newsroom, “The history of Porsche begins electrically”, , 2019, URL: <https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/history-18563.html>.



- [8] M. GM, “GM comemora 50 anos das células movidas a hidrogênio”, , 2016, URL: <https://media.gm.com/media/ca/fr/chevrolet/news.detail.html/content/Pages/news/br/pt/2016/oct/1010-comemora.html>.
- [9] R. Baran, L. F. L. Legey, “Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil”, *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n 33, p 207-224, mar 2011, 2011.
- [10] IEA, “Global EV Data Explorer”, , 2022, URL: <https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer>.
- [11] K. V. Singh, H. O. Bansal, D. Singh, “A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components”, *Journal of Modern Transportation*, vol. 27, no. 2, pp. 77–107, 2019.
- [12] F. Blaabjerg, H. Wang, I. Vernica, B. Liu, P. Davari, “Reliability of power electronic systems for EV/HEV applications”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1060–1076, 2020.
- [13] B. Sarlioglu, C. T. Morris, D. Han, S. Li, “Driving toward accessibility: a review of technological improvements for electric machines, power electronics, and batteries for electric and hybrid vehicles”, *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 14–25, 2016.
- [14] R. T. Mehrjardi, N. F. Ershad, M. Ehsani, “Transmotor-Based Powertrain for High-Performance Electric Vehicle”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1199–1210, 2020.
- [15] M. Loganathan, C. M. Tan, B. Mishra, T. A. Msagati, L. W. Snyman, “Review and selection of advanced battery technologies for post 2020 era electric vehicles”, in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, pp. 1–5, IEEE, 2019.
- [16] C. Liu, K. Chau, C. H. Lee, Z. Song, “A critical review of advanced electric machines and control strategies for electric vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1004–1028, 2020.
- [17] M. Abdalmagid, E. Sayed, M. Bakr, A. Emadi, “Geometry and Topology Optimization of Switched Reluctance Machines: A Review”, *IEEE Access*, 2022.
- [18] S. D. Umans, *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*, AMGH Editora, 2014.
- [19] S. J. Chapman, *Fundamentos de máquinas elétricas*, AMGH editora, 2013.
- [20] M. Cheng, P. Han, G. Buja, M. G. Jovanović, “Emerging multiport electrical machines and systems: Past developments, current challenges, and future prospects”, *IEEE Transactions on Industrial electronics*, vol. 65, no. 7, pp. 5422–5435, 2017.
- [21] T. Guo, N. Schofield, A. Emadi, “Double segmented rotor switched reluctance machine with shared stator back-iron for magnetic flux passage”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, pp. 1278–1286, 2016.
- [22] M. Asgar, E. Afjei, H. Torkaman, “A new strategy for design and analysis of a double-stator switched reluctance motor: Electromagnetics, FEM, and experiment”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 12, pp. 1–8, 2015.
- [23] C. S. Kim, G. Lee, K. Lee, J. Lee, Y. Cho, J. H. Won, H. Shin, C. Choi, H. K. Bae, “Design of π core and π 2 core PM-aided switched reluctance motors”, in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, pp. 1–6, IEEE, 2012.
- [24] B. R. Kumar, K. Sivakumar, S. Karunanidhi, “A new Dual Stator-Dual Rotor Switched Reluctance Motor for Electric vehicle propulsion”, in *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1–4, IEEE, 2018.
- [25] E. Nordlund, C. Sadarangani, “The four-quadrant energy transducer”, in *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344)*, vol. 1, pp. 390–397, IEEE, 2002.
- [26] T. Guo, *Double Rotor Switched Reluctance Machine with Segmented Rotors*, Dissertação de mestrado, 2014.



ANEXO I

Retirado de [26].

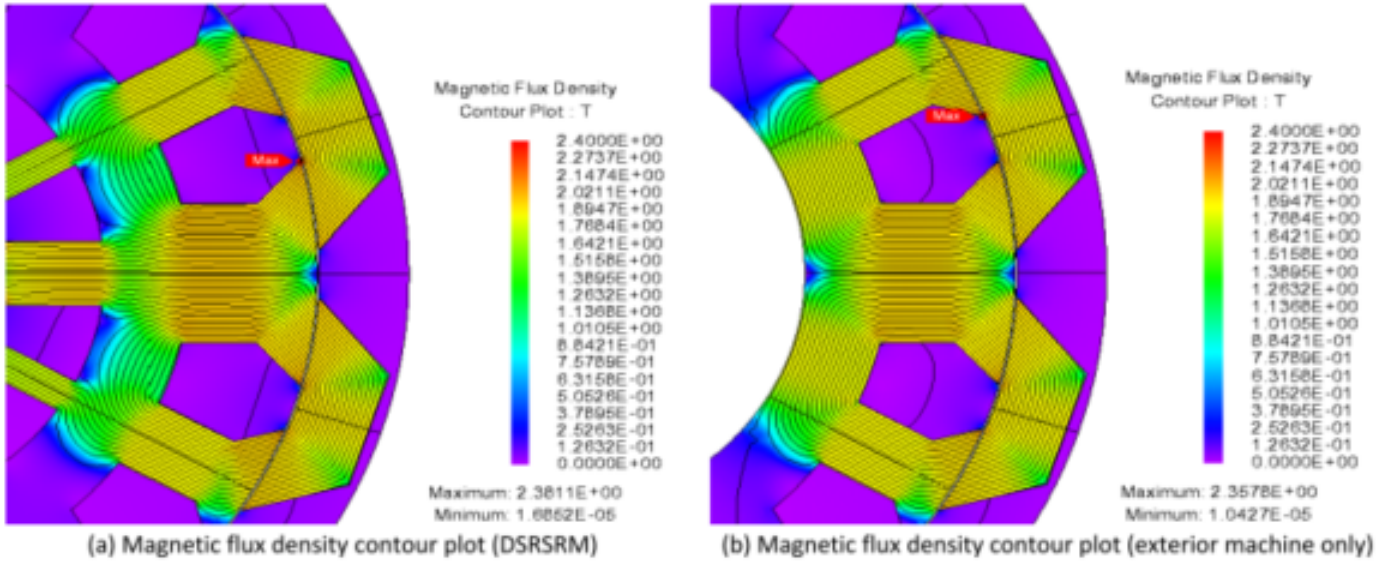


Figure 3.18 Magnetic flux density comparison between exterior machine only and DRSRSM

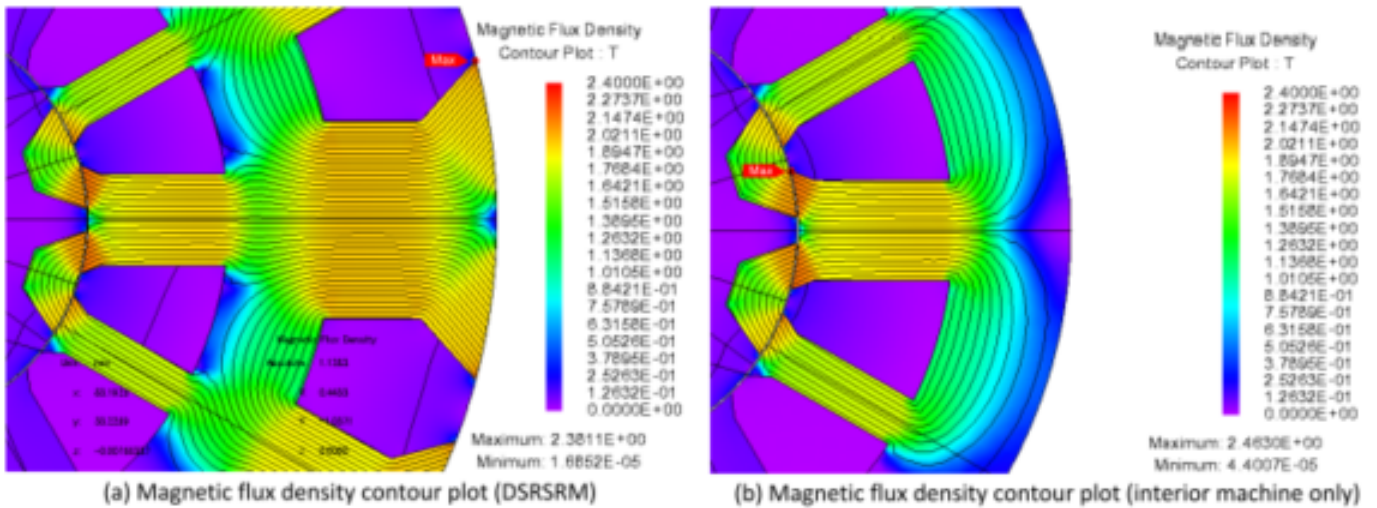


Figure 3.19 Magnetic flux density comparison between interior machine only and DRSRSM

ANEXO II

Retirado de [26].

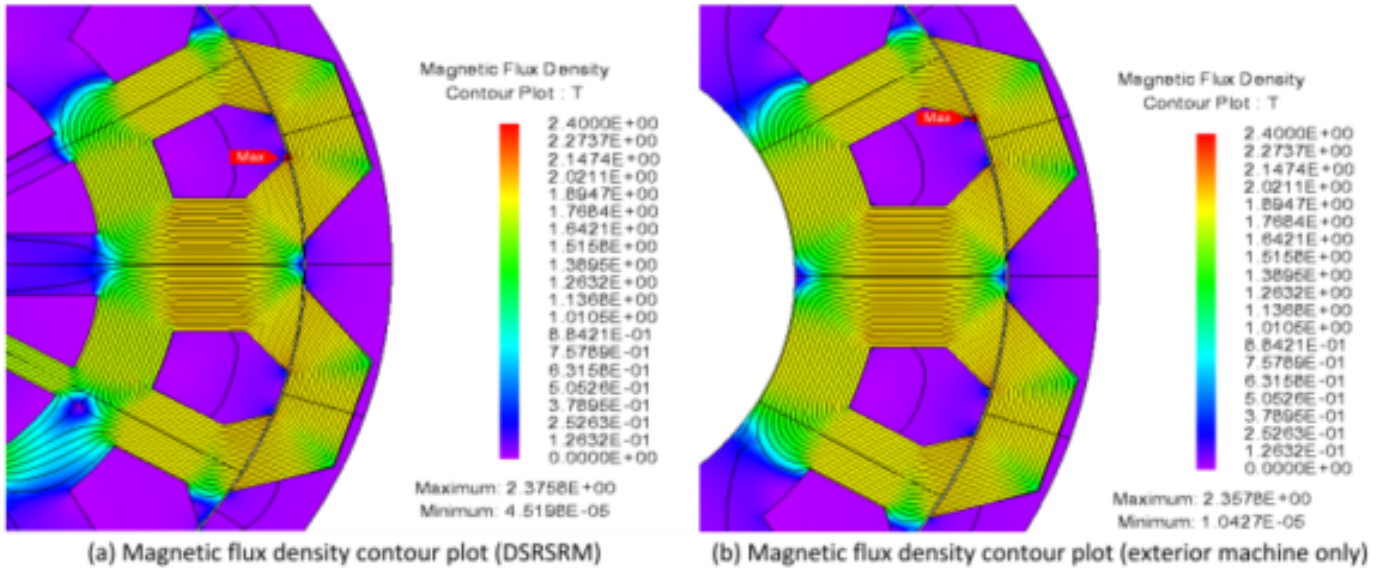


Figure 3.16 Magnetic flux density comparison between exterior machine only and DSRSRM

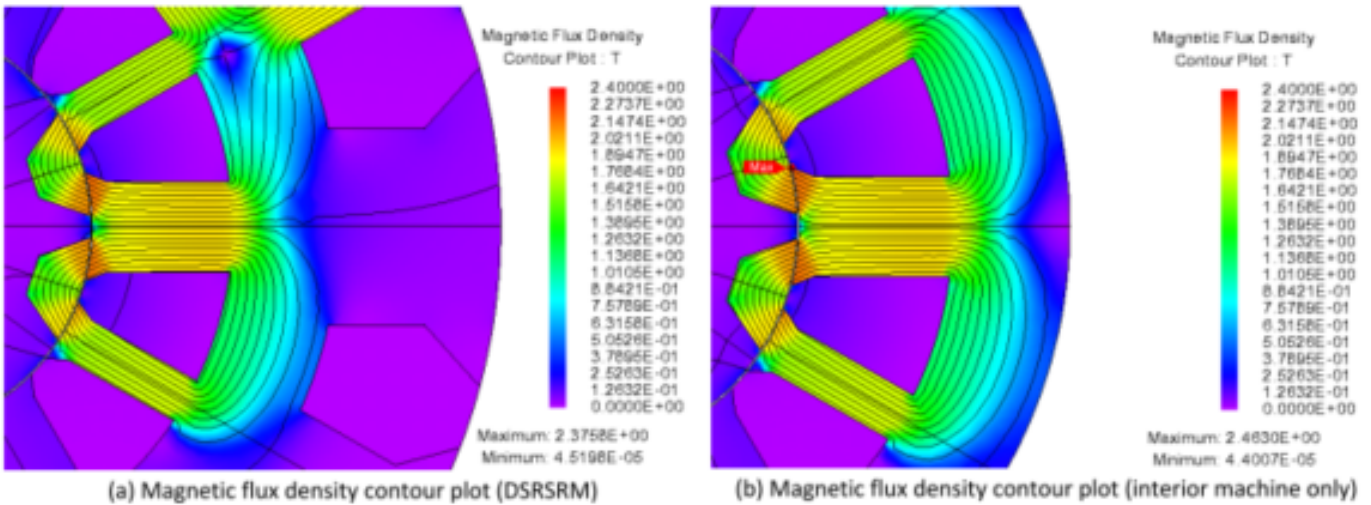


Figure 3.17 Magnetic flux density comparison between interior machine only and DSRSRM

ANEXO III

Retirado de [26].

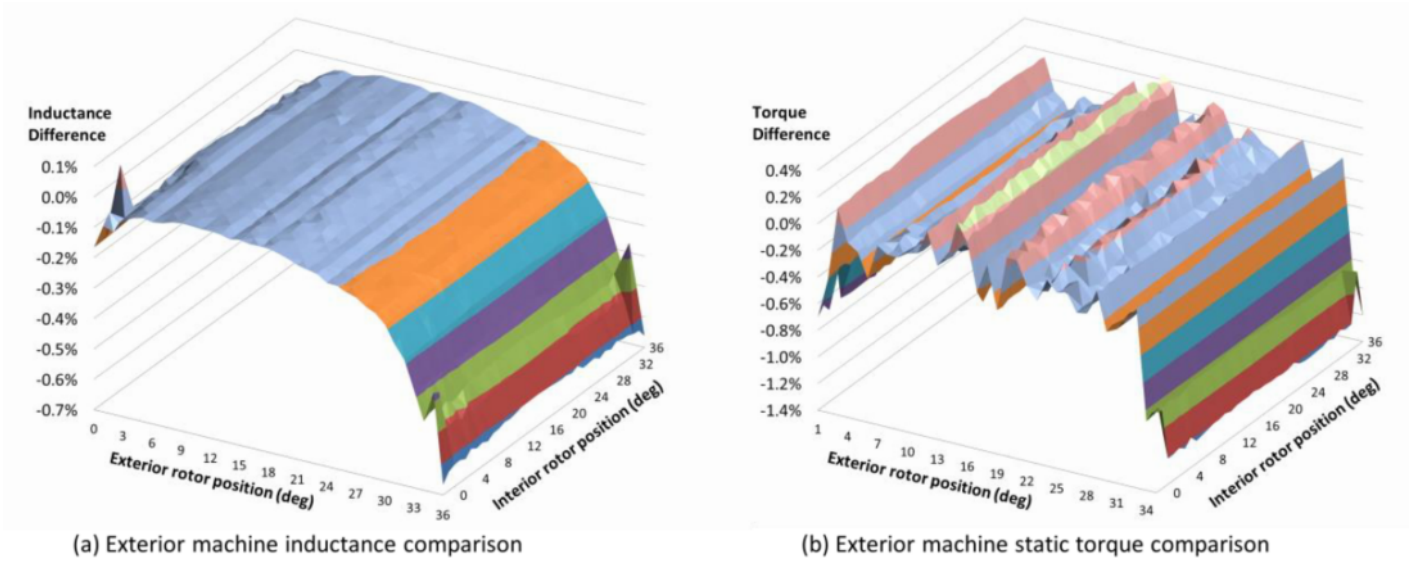


Figure 3.22 Coupling effect on exterior machine characteristics (adjacent phases excited)

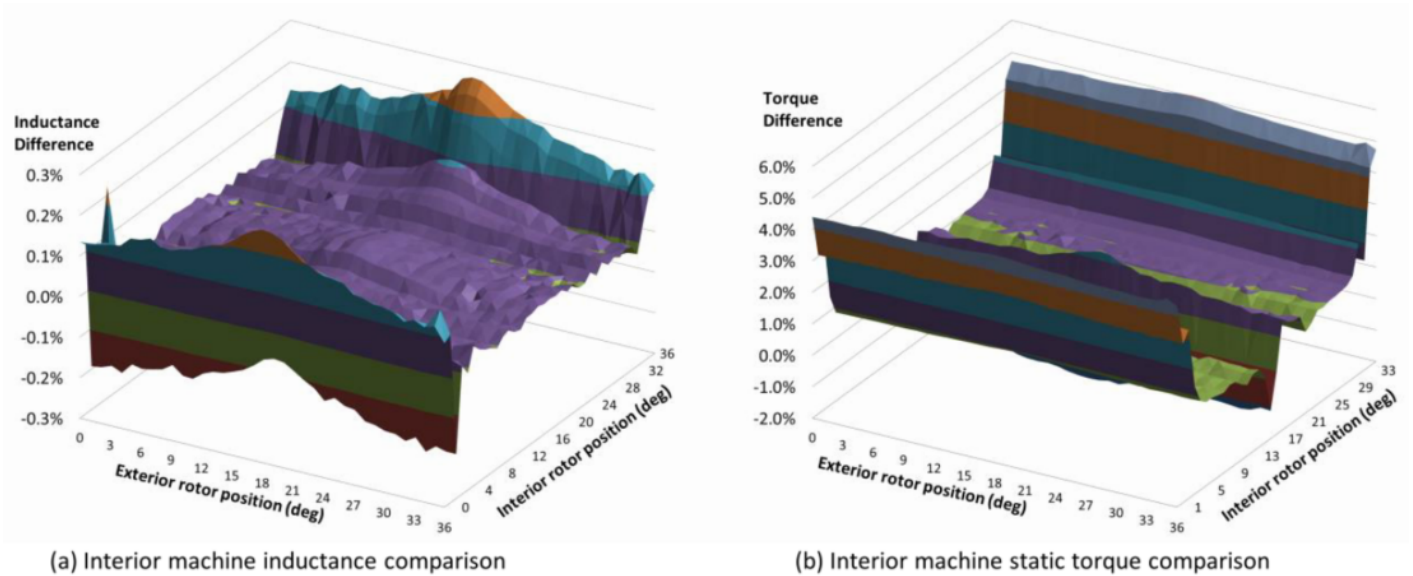


Figure 3.23 Coupling effect on interior machine characteristics (adjacent phases excited)

ANEXO IV

Retirado de [26].

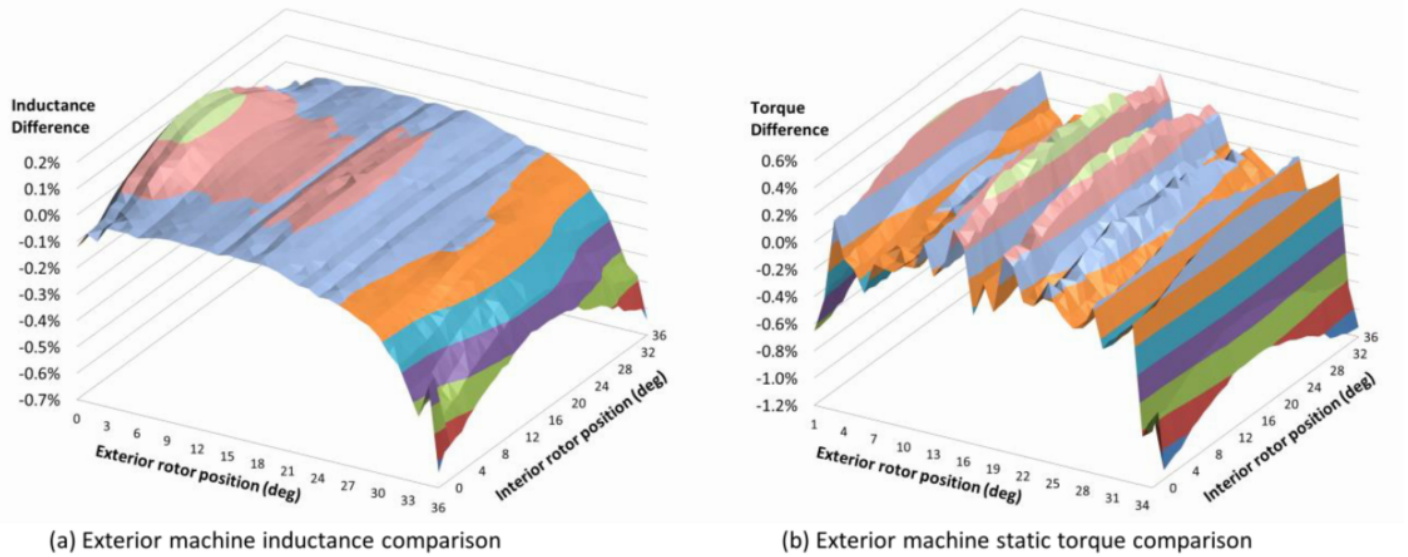


Figure 3.24 Coupling effect on exterior machine characteristics (same phases excited)

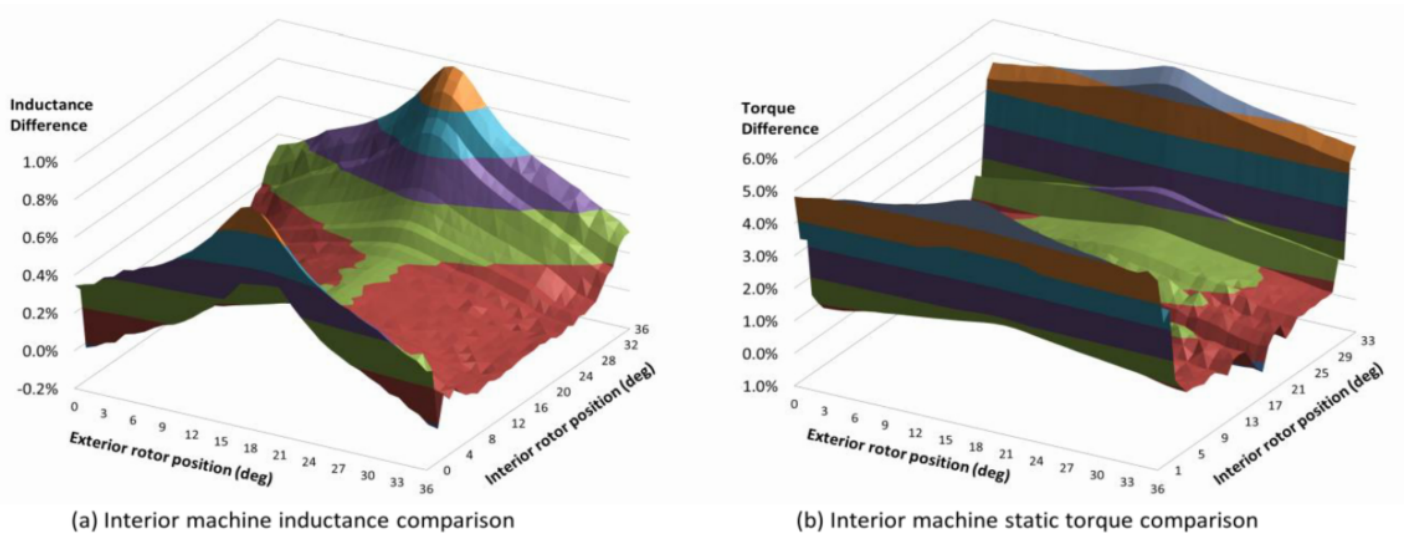


Figure 3.25 Coupling effect on interior machine characteristics (same phases excited)

JEAN LESCOWICZ

ESTUDO DO MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE ESTATOR COMPARTILHADO E DUPLO ROTOR SEGMENTADO PARA APLICAÇÃO EM CARROS ELÉTRICOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 06 de julho de 2022.

Prof. Dr. Arthur Garcia Bartsch
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Eng. MSc. Rafael Barbetta
WEG

Prof. Dr. Denivaldo Pereira da Silva (IFSC/Rau)
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau



Datas e horários baseados no fuso horário (GMT -3:00) em Brasília, Brasil
Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON)
Certificado de assinatura gerado em 25/07/2022 às 17:31:27 (GMT -3:00)

TermoDeAprovacao_TCC_EngEletrica_IFSC_JGS_RAU_06072022_JEAN
LESCOWICZ

ID única do documento: #7425880e-dbae-453a-a261-348d66b9dfa9

Hash do documento original (SHA256): 8968093d551c45e0d3fa97925430df7addf7eb090a13bc794772eb3b94365d25

Este Log é exclusivo ao documento número #7425880e-dbae-453a-a261-348d66b9dfa9 e deve ser considerado parte do mesmo, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso.

Assinaturas (3)

- ✓ **Arthur Garcia Bartsch (Participante)**
Assinou em 25/07/2022 às 14:46:15 (GMT -3:00)
- ✓ **Rafael Barbeta (Participante)**
Assinou em 26/07/2022 às 07:23:57 (GMT -3:00)
- ✓ **Denivaldo Pereira da Silva (Participante)**
Assinou em 25/07/2022 às 15:20:58 (GMT -3:00)

Histórico completo

Data e hora

25/07/2022 às 17:31:27
(GMT -3:00)

25/07/2022 às 17:46:15
(GMT -3:00)

Evento

Arthur Garcia Bartsch solicitou as assinaturas.

Arthur Garcia Bartsch (Autenticação: e-mail arthur.bartsch@ifsc.edu.br; IP: 179.223.196.136) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

Data e hora

25/07/2022 às 18:20:58
(GMT -3:00)

Evento

Denivaldo Pereira da Silva (Autenticação: e-mail denivaldo.silva@ifsc.edu.br; IP: 131.100.93.84) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

26/07/2022 às 10:23:57
(GMT -3:00)

Rafael Barbeta (Autenticação: e-mail rafaelsb@weg.net; IP: 161.69.121.37) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.