

**PROPOSTA DE PROJETO DE PESQUISA
EDITAL FUNDEP - ROTA 2030 – CHAMADAS LINHA V – PROPULSÃO
ALTERNATIVA À COMBUSTÃO**

**Título do Projeto: Pesquisa e Desenvolvimento de *Powertrain* Elétrico de
Alto Desempenho para Automóveis**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
FUELTECH LTDA**

**Coordenador Geral: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert (UFRGS)
Coordenador Associado: Prof. Dr. Rodrigo Padilha Vieira (UFSM)**

Linha Temática Principal: Projeto e construção de motores / geradores
elétricos para veículos elétricos e híbridos

Maio de 2020

1 - Resumo

Este projeto apresenta a proposta de pesquisa e desenvolvimento de um *powertrain* elétrico de alto desempenho para aplicação em veículos elétricos. A proposta compreende o desenvolvimento da máquina elétrica, do inversor e do sistema de gerenciamento de baterias (*Battery Management System* - BMS). Os três equipamentos a serem desenvolvidos apresentam aspectos inovadores e devem ser integrados com a adição de um *banco* de baterias para compor um *powertrain* elétrico que pode ser empregado tanto para conversão combustão-elétrica como para sistemas de tração de novos veículos elétricos leves, pesados, ou agrícolas. O principal nicho de mercado pretendido pela empresa parceira - Fueltech S.A. - é a conversão combustão-elétrica de veículos leves; portanto, propõe-se ao final do projeto instalar o sistema desenvolvido em um carro de passeio para validação e testes.

A proposta tem com um dos principais pilares o desenvolvimento da máquina elétrica. Estudos realizados no Laboratório de Máquina Elétricas, Acionamentos e Energia da UFRGS com a topologia de fluxo axial no entreferro, com duplo rotor de ímãs permanentes na superfície e armadura segmentada (YASA – *Yokeless and Segmented Armature*) incorporam aspectos inovadores no projeto como: aumento do número de fases (mais que três fases), uso de aço-elétrico de grão superior orientado e alteração do formato dos segmentos da armadura. Assim é possível aumentar a tolerância a falhas, aumentar o rendimento e aumentar ainda mais densidade de potência e conjugado (densidades que já são muito superiores quando comparados a máquinas convencionais). O principal aspecto inovador relativo ao inversor é o desenvolvimento do controle vetorial sem sensores mecânicos (*sensorless*) aplicado ao sistema multifásico. Já o aspecto inovador do BMS é a modularização para permitir aplicação a uma ampla faixa de tensão elétrica, tornando-o versátil e facilmente empregável aos mais distintos requisitos em termos de volume de células.

2 - Objetivos da Proposta

Objetivo Geral:

O objetivo geral do trabalho é o desenvolvimento de máquina elétrica, inversor e BMS para compor um *powertrain* elétrico para aplicação veicular que seja de alto desempenho, principalmente no que diz respeito: à densidade de potência, à densidade de conjugado, ao rendimento, à tolerância a falhas e à segurança.

Objetivos Específicos:

- Determinação dos requisitos de potência, conjugado e velocidade de um *powertrain* elétrico de um veículo leve com base em dados técnico do veículo e em ciclos de condução;
- Desenvolvimento de máquina elétrica de fluxo axial do tipo YASA que produza densidade de conjugado máximo com nível compatível ou superior aos encontrados no estado da arte;
- Obtenção de máquina elétrica e inversor multifásico que possa operar sob a ação de falhas elétricas em uma ou mais fases sem interromper o funcionamento;
- Teste e validação *hardware-in-the-loop* dos sistemas de acionamento e controle e da máquina de fluxo axial multifásica;
- Teste e validação *hardware-in-the-loop* dos sistemas de regeneração de energia e sistema para reconfiguração de chaves e tolerância a falhas;
- Desenvolvimento de técnicas de controle *sensorless* e tolerante a falhas em máquinas de fluxo axial YASA multifásicas para aumentar a robustez do sistema;
- Estudo e desenvolvimento de técnicas e métodos de refrigeração forçada para máquinas elétricas e inversores para aplicação veicular;
- Inclusão de alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado no desenvolvimento de pesquisas sobre máquina elétricas, veículos elétricos e controle de máquinas;
- Desenvolvimento de um BMS modular que possa operar com diferentes níveis de tensão;
- Desenvolvimento de um sistema de comunicação entre inversor, BMS e VCU (*Vehicle Central Unit*) para gerenciamento e atuação em caso de operação não ideal do banco de baterias;
- Teste e validação em campo do *powertrain* desenvolvido e análise do desempenho do veículo conversão combustão-elétricas de veículo;
- Avaliação do potencial de fabricação e comercialização dos equipamentos individuais e do *powertrain* desenvolvido.

3 - Justificativa e Relevância

Um dos problemas associados à limitação do avanço da transição dos veículos à combustão para tecnologias de veículos elétricos e/ou híbridos no Brasil reside no fato de que, em sua grande maioria, os itens são importados e apresentam elevado custo. Neste contexto, este projeto propõe o desenvolvimento de equipamentos e tecnologias nacionais com aspectos inovadores para componentes importantes de VE, que são: a máquina elétrica, o inversor e o sistema de gerenciamento do sistema de baterias (BMS).

No que diz respeito a máquinas elétricas para VE, existem uma grande variedade de topologias e formas construtivas. Um aspecto importante é possibilidade de redução de volume, massa e, portanto, a quantidade de material para produção do motor. Uma forma de mensurar esse aspecto é por meio da densidade de conjugado (Nm/m^3), densidade específica de conjugado (Nm/kg), densidade de potência (kW/m^3) e/ou densidade específica de potência (kW/kg). Segundo MAGNAX (2020), a densidade de potência de pico de um motor do modelo BMW i3 é de 2,7 kW/kg enquanto que da topologia YASA é maior que 13 kW/kg . Isso implica que a massa do motor, e consequentemente de material para fabricação, pode ser reduzida em aproximadamente 5 vezes. Se a densidade de potência máxima da topologia YASA é comparada com um motor de indução industrial de potência equivalente, que tem densidade específica de potência de pico na ordem de 0,25 kW/kg - calculado a partir de dados disponíveis em (WEG, 2020) - a massa da YASA pode ser até 50 vezes menor.

Portanto, um dos principais motivadores para investir no desenvolvimento e aperfeiçoamento da topologia YASA está na possibilidade de fabricação do motor com menor massa, volume e material quando comparado à maioria das outras topologias. Esse aspecto confere competitividade e um abrangente mercado no âmbito da eletrificação de veículos. Neste projeto, propõe-se a incorporação de aspecto inovadores, discutidos em mais detalhes na Seção 4 deste projeto. Entretanto, destaca-se o aspecto de projeto que aumenta o número de fases da máquina para um número maior que três (convencional máquina trifásica). O aumento do número de fases permite que a máquina possa continuar operando mesmo quando ocorrer alguma falha em uma ou mais fases tanto da máquina como do inversor. Isso não ocorre em máquinas trifásicas, que perdem a capacidade de produzir conjugado síncrono, de tração, quando uma fase é perdida. Isso aumenta a confiabilidade, a robustez e segurança do sistema elétrico de tração, pois o veículo pode continuar se locomovendo, com potência reduzida, mesmo na presença de falhas no sistema. Esse aspecto é ainda mais relevante em áreas como o de aviação, que também tem interesse em eletrificação.

O desenvolvimento do inversor de frequência proposto no projeto está associado ao desenvolvimento do motor, ou seja, será desenvolvido para acionar o motor multifásico. Portanto, os aspectos de inovação relativos ao inversor são o desenvolvimento de técnicas de controle vetorial multifásico para garantir robustez e tolerância a falhas. Destaca-se que o aumento do número de fases aumenta o número de chaves estáticas do circuito de potência; entretanto, a potência total é dividida igualmente entre o número de fases do inversor. Assim, o aumento do número de fases não aumenta necessariamente o custo do inversor quando comparado com um trifásico de potência equivalente, pois a potência de cada chave do sistema multifásico é menor que a do sistema trifásico. Outro aspecto de pesquisa inovador em relação ao desenvolvimento do inversor é a utilização de técnicas de controle sem sensores mecânicos de velocidade ou posição (técnica *sensorless*), aplicada a máquinas multifásicas do tipo YASA. A técnica é difundida para máquinas trifásicas, mas é pouco explorada em multifásicas. Ela tem como atrativo a redução de custo do sistema (pois elimina esse sensor) e aumento da robustez (pois reduz o número de sensores susceptíveis à falha).

Por fim, destaca-se que a crescente demanda de baterias de alta tensão, principalmente proporcionada pela popularização de estudos a respeito de veículos elétricos, apresenta um dos grandes desafios na concepção de um BMS. Trata-se de como lidar com os diferentes níveis de tensão elétrica dentro do hardware do equipamento. Portanto, este projeto propõe a pesquisa e desenvolvimento de um BMS modular, para contornar este problema. Essa abordagem prevê a associação de pequenos módulos de monitoramento, conectados a uma pequena parcela de células dentro do conjunto completo, todos eles conectados a um barramento de comunicação isolada. Assim, cada dispositivo de monitoramento pode ser conectado a uma unidade central de processamento, responsável pela análise das informações de todas as células, bem como pelo envio destes dados a dispositivos externos. Desta forma, o BMS pode ser empregado para diversos níveis de tensão e diferentes formas de agrupamento das células. Isso confere versatilidade ao equipamento, pois o número de módulos pode ser adequado para cada banco de baterias. Assim, expande-se o nicho de mercado quando comparado a tecnologias difundidas, que são produzidas para níveis fixos de tensão.

Embora o conjunto motor-inversor e o BMS possam ser produzidos e comercializados independentemente, os mesmos serão integrados, com a incorporação de um banco de baterias, para formar um *powertrain* de alto desempenho. Este sistema forma o *powertrain* de um veículo e pode ser aplicado a veículos novos ou para conversão combustão-elétrica de veículos. Com vista ao nicho de atuação da empresa parceira, um lote piloto será aplicado à conversão combustão-elétrica de um veículo de passeio leve.

4 - Introdução e Estado da Arte

Atualmente, é consenso na sociedade científica, governos e indústrias que uma forma de redução das emissões de gases que provocam o efeito estufa é através da migração dos tradicionais veículos a combustão interna (VCI) para os veículos elétricos (VE). Adicionalmente, os VCI conseguem atingir um rendimento menor de 30% enquanto sistemas puramente elétricos operam com rendimentos muito superiores. Máquinas elétricas podem operar com rendimentos superiores a 90% (Zhang, M. et. Al. 2014). Além disso, máquinas elétricas podem operar com regeneração da energia cinética durante frenagens (Bilgin, B. et. Al. 2015), o que torna o rendimento global do sistema ainda maior. Por outro lado, existem alternativas sustentáveis para suprir o aumento da demanda por energia elétrica, com a inserção de VE, por meio da produção a partir de energias limpas, ou seja, geradas a partir de fontes que não emitem CO₂, como sistemas fotovoltaicos, eólicos ou hídricos.

Por conta disso, o progresso mundial nos últimos anos associado à utilização de VE foi notável. Entretanto, no Brasil ainda se verifica o estágio inicial desta transição. De acordo com o relatório anual da IEA (2019), em 2018 o percentual de veículos elétricos e híbridos no Brasil era de 0,02% do total de veículos em circulação, enquanto alguns países atingem percentuais bem superiores como: Canadá (2,32%), China (4,48%), Holanda (6,57%), Noruega (46,42%) e Estados Unidos (2,1%).

Para promover a inserção da tecnologia de tração elétrica é preciso desenvolver tecnologias nacionais para que o país não seja totalmente dependente de produtos importados. Neste contexto, na UFRGS e na UFSM vem sendo conduzidas pesquisas pelos coordenadores desta proposta e por integrantes em nível de pós-graduação para desenvolver componentes de veículos elétricos e metodologias de controle aplicadas.

Em particular é estuada a topologia de uma máquina elétrica com fluxo axial com duplo rotor a ímãs permanentes na superfície e armadura segmentada, de desenvolvimento relativamente recente (WOOLMER, T. J. J.; MCCULLOCH, M.D., 2006), quando comparada com topologias como motores de corrente contínua e motores de indução, que foram desenvolvidos há mais de 100 anos.

A Figura 1 ilustra uma imagem da máquina mostrando somente as partes eletromagnéticas ativa. Não são mostrado aspectos estruturais e de refrigeração forçada. Pode-se observar nessa figura que a máquina tem dois rotores, compostos de culatra ferromagnética e ímãs permanentes setoriais, segmentos de armadura e enrolamento de armadura.

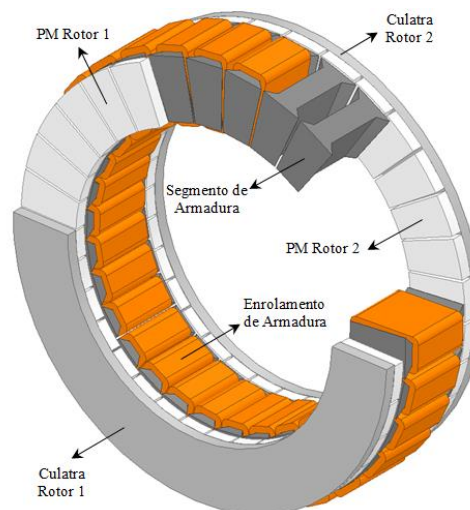


Figura 1 – Imagem ilustrativa com indicativo das partes ativas da estrutura eletromagnética da topologia YASA em estudo, elaborada por integrantes da equipe.

Conforme já mencionado na Seção 3, um dos grandes atrativos destas topologias é a elevada densidade de conjugado e potência, inclusive quando comparadas com tecnologias de motores que atualmente são empregadas em veículos. Esta topologia de motor pode ser considerado o estado da arte e termos de motor elétrico para tração. Aplicações recentes em sistemas de alto desempenho incluem uso em aviões puramente elétricos e em carros de elevado valor agregado como Ferrari.

Em vista destes atrativos, existam empresas baseadas unicamente na comercialização dessa tecnologia, como a britânica YASA Limited e da belga Magnax BVBA. Entretanto, pesquisa que vem sendo realizadas na UFRGS e UFSM incorporados aspectos de pesquisa que tornam a topologia ainda mais atrativa. As inovações incluem uso de novos materiais para a tecnologia de motores, aumento do número de fases aplicado à topologia YASA e alterações no formato dos segmentos da armadura.

A armadura segmentada foi inicialmente proposta utilizando o material ferromagnético macio denominado SMC (*Soft Magnetic Composite*), isotrópico, possibilitando a extensão do entreferro na direção radial até o limite das cabeceiras dos enrolamentos (WOOLMER, T. J. J.; MCCULLOCH, M.D., 2006). Entretanto, verifica-se que nessa topologia de motor o fluxo na armadura se estabelece em uma única direção, ou seja, no sentido axial. Isso não é observado praticamente em nenhuma outra topologia de motor, principalmente não é observado em topologias de fluxo radial. Essa característica permite o uso de material ferromagnético de grão orientado (*Grain Oriented* - GO), ou de grão

superorientado. Esse material apresenta maior densidade de fluxo de saturação na direção de magnetização e apresenta perdas inferiores quando comparado ao SMC ou quando comparado com grão não orientado (Non-Grain Oriented - NGO).

Além disso, o emprego de um elevado número m de fases ($m > 3$) possui diversas vantagens em relação aos sistemas trifásicos como: aumenta a constante de conjugado; permite a injeção de harmônicas de corrente aumentando a densidade de conjugado da máquina; reduz a corrente por fase sem a necessidade de aumentar a tensão de fase; reduz a oscilação de conjugado eletromagnético e os ruídos, além de aumentar a tolerância a falhas (PARSA, 2005). O emprego de um elevado número de fases aplicado à topologia YASA não foi encontrado na literatura.

Além disso, estudos realizados pelo grupo mostraram que alteração no formato do segmento da armadura, que na literatura é setorial, para um formato trapezoidal pode também trazer ganhos importantes na distribuição de fluxo magnético, do motor que resultam em aumento de conjugado para a mesma condição de carregamento elétrico e magnético.

Para exemplificar, na Tabela 1 são mostrados resultados de densidade de conjugado comparando um motor que usa material de grão orientado e não orientado, que usa armadura setorial ou trapezoidal e com diferente número de fases.

Tabela 1 – Resultados de simulação numérica obtidos em estudos realizados por membros da equipe (Nm/m³).

Material	NGO	GO	
Formato Armadura	Setorial	Setorial	Modificado
Número de fases			
3	58464	61022	70502
5	65521	69107	79624
15	66082	73509	82068

É possível observar que a partir da Tabela 1 que a comparação entre a máquina com topologia convencional (trifásica que utiliza material de grão não orientado e com segmentos setoriais) é aproximadamente 40 % menor que a topologia que incorpora as modificações propostas pelo projeto de pesquisa. Os resultados apresentados na Tabela 1 ainda não foram publicados, mas estão contidos na tese de um dos integrantes da equipe (Evandro Goltz) que está em fase final de escrita.

Uma máquina elétrica em escala reduzida, que incorpora, as modificações mencionadas na máquina está sendo construída. O exemplo de um segmento de armadura da máquina é mostrado na Figura 2.

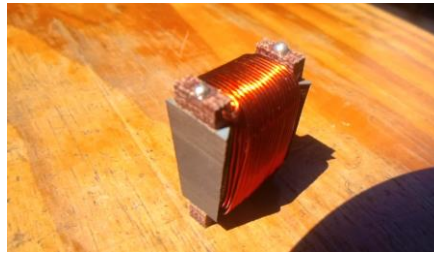


Figura 2 – Fotografia de um segmento da armadura construído com chapas elétricas de grão orientado.

Associado ao aumento do número de fases do projeto, incorpora-se uma outra vantagem importante, que é a possibilidade da máquina continuar produzindo conjugado de tração, mesmo quando ocorrem falhas em uma ou mais fases tanto da própria máquina como em um ou mais braços do inversor. Isso confere robustez ao sistema multifásico. Neste sentido, este projeto propõe o desenvolvimento do inversor da máquina que faça o acionamento vetorial sem sensores mecânicos e tracione a máquina mesmo em condições de falta.

Além do desenvolvimento do motor e do inversor, este projeto propõe o desenvolvimento de um importante equipamento presente em veículos elétricos e híbridos, o sistema de gerenciamento de baterias denominado BMS (*Battery Management System*). Com este equipamento, é possível prolongar a vida útil das baterias, mitigar os riscos durante o manuseio, e captar informações importantes do banco de baterias o que possibilita a tomada de algumas ações de segurança como limitação da corrente de carga e descarga da bateria. A Figura 3 apresenta um diagrama que relaciona as grandezas envolvidas na interação de um BMS com uma bateria.

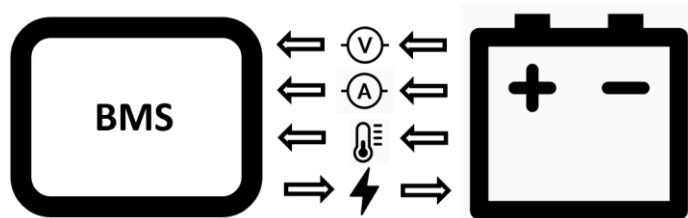


Figura 3 – Diagrama de grandezas envolvidas na interação entre um BMS e uma bateria.

A partir da obtenção de algumas medidas, tais como a medida de tensão elétrica, temperatura e corrente elétrica das células, é possível definir no dispositivo BMS limites

seguros de operação, que podem ser diagnosticados através de saídas específicas ou até mesmo por canais de comunicação. Alguns modelos de BMS ainda podem atuar em conjunto com sistemas de carga, fornecendo informações em tempo real, as quais são utilizadas na determinação dos parâmetros de carregamento. Outra característica imprescindível de um BMS é a capacidade de realizar a equalização da tensão das células presentes em uma bateria, o que aumenta a vida útil do conjunto, homogeneizando-se o sistema como um todo.

A crescente demanda de baterias de alta tensão, principalmente proporcionada pela popularização de estudos a respeito de veículos elétricos, apresenta um dos grandes desafios na construção de um BMS. Trata-se de como lidar com os diferentes níveis de tensão elétrica dentro do *hardware* do equipamento. Neste contexto, este projeto visa realizar pesquisa para desenvolvimento de BMS onde seja possível agrupar pequenos módulos de monitoramento, conectados a uma pequena parcela de células dentro do conjunto completo, todos eles conectados a um barramento de comunicação isolada (sem interferência dos distintos níveis de tensão elétrica), onde cada dispositivo de monitoramento pode ser conectado a uma unidade central de processamento, responsável pela análise das informações de todas as células, bem como pelo envio destes dados à dispositivos externos. A Figura 2 ilustra o diagrama de um BMS modular.

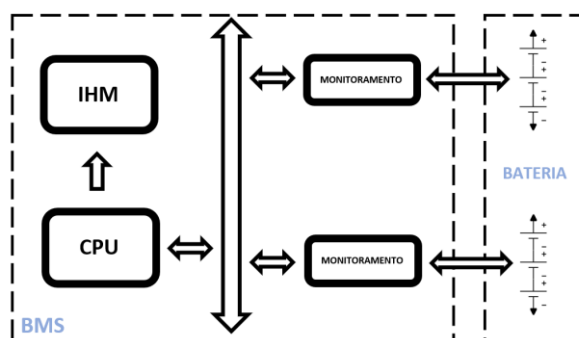


Figura 4 – Exemplificação de um BMS modular.

Atualmente, na fase de planejamento de um projeto, a escalabilidade é um fator relevante a ser considerando. A possibilidade de expansão pode resultar em novos produtos de uma mesma linha, ou viabilizar a assertividade no atendimento de demandas do mercado (existem projetos com baterias que vão de 48V a até 800V). Portanto, o grande diferencial do BMS proposto é a ampla faixa de tensão elétrica operável, tornando-o versátil e facilmente empregável aos mais distintos requisitos em termos de volume de células. Como resultado, é possível obter um produto ajustado aos padrões dos consumidores, de forma que o custo final possa ser compatível com a grandeza do projeto.

5 - Metodologia

A metodologia empregada para o desenvolvimento do projeto pode ser dividida em cinco grupos: determinação dos requisitos de projeto, estudo de alternativas e técnicas encontradas na literatura e no mercado, modelagem analítica e numérica, fabricação de protótipos e por fim ensaios para validação experimental.

5.1 - Determinação dos requisitos de projeto

A determinação dos requisitos de projeto do *powertrain* para fins de especificação dos valores de conjugado, velocidade e potência do mesmo, além da especificação do banco de baterias será realizada em duas etapas.

Na primeira etapa deve-se fazer uma pesquisa sobre características mecânicas de carros comerciais com vistas à conversão de um carro à combustão para elétrico a fim de selecionar um modelo no qual deve ser instalado o *powertrain* desenvolvido ao final do projeto para fins de validação e análise de desempenho. Esta pesquisa deve levar em conta espaço para alocação do banco de baterias e do conjunto motor-inversor depois de removidos o tanque e os componentes do motor à combustão. Também deve ser levado em conta custo do veículo, a potência, velocidade e conjugado nominal do motor à combustão original.

Na segunda etapa serão consideradas as características do carro definido na primeira etapa para simulação numérica desse veículo trafegando em diversos ciclos de condução considerando inclusive frenagem regenerativa. Essa análise vai permitir determinar valores nominais e máximos de conjugado, velocidade e potência do *powertrain* elétrico. Além disso, também vai permitir dimensionar o banco de baterias considerando os ciclos de condução com uma autonomia pretendida.

5.2 - Estudo de alternativas e técnicas encontradas na literatura e no mercado

Para o desenvolvimento do motor elétrico serão avaliados os materiais magnéticos (chapas de grão orientado ou de grão superiorizado e ímãs permanentes de elevado produto energético) disponíveis do mercado para fabricação do protótipo. A partir da definição dos materiais magnéticos será possível empregar as propriedades destes para avaliação de desempenho eletromagnético em modelos e simulações. Também devem ser avaliadas técnicas de refrigeração forçada de motores e fluídos de refrigeração para avaliação da aplicabilidade aos protótipos dos motores YASA. A partir da definição do fluído será possível

empregar as propriedades destes para avaliação de desempenho térmico em modelos e simulações. Por fim, deve-se avaliar as técnicas de controle aplicada em máquinas multifásicas para adaptação à topologia YASA multifásica proposta neste projeto.

Para o desenvolvimento do inversor deve-se avaliar os componentes eletrônicos disponíveis no mercado para concepção do protótipo, principalmente no que diz respeito às chaves estáticas de potências, que devem ser rápidas e apresentar baixas perdas. Deve-se avaliar as topologias de circuitos eletrônicos de potência do inversor multifásico para aplicação ao projeto de acionamento do motor. Também serão avaliados fluídos e métodos de refrigeração forçada dos inversores. A partir da definição do fluído será possível empregar as propriedades destes para avaliação de desempenho térmico em modelos e simulações. Por fim, deve-se avaliar as técnicas de controle vetorial para máquinas multifásicas e técnicas *sensorless* para avaliação de adaptação para uso com a topologia YASA multifásica.

Para o desenvolvimento do BMS deve-se avaliar as funcionalidades dos produtos que já estão no mercado, avaliar alternativas de componentes eletrônicos dedicados para aplicação, analisar as técnicas e circuitos encontradas na literatura científica a fim de desenvolver a tecnologia modular que permita uso em diversos níveis de tensão e com diversos arranjos.

5.3 - Modelagem analítica e numérica

Para o projeto do motor, inicialmente serão aplicados modelos analíticos já desenvolvidos e validados em projetos de pesquisa conduzidos por integrantes para realizar o dimensionamento preliminar, que permitem determinar as relações dimensionais e obter uma estimativa para desempenho na conversão eletromecânica de energia. Uma vez determinadas as dimensões básicas das máquinas, serão elaborados modelo numéricos tridimensionais pelo método dos elementos finitos (com pacote comercial Ansys Electronics[®], disponível na UFRGS) que permitem realizar a simulação eletromagnética do dispositivo. As propriedades magnéticas dos materiais magnéticos do motor são avaliadas por meio de dados fornecidos pelos fabricantes e por meio de caracterização magnética dos materiais macios e duros nas condições de carregamento elétrico, em termos de amplitude e frequência, utilizando histeresímetros (disponíveis na UFRGS). Essas caracterizações são importantes para representar adequadamente o dispositivo operando sob diferentes condições de carregamento elétrico, principalmente em termos de frequências com a presença de harmônicas que os fabricantes não disponibilizam. Estes dados são indispensáveis para representar o modelo de

perdas ferromagnéticas na máquina e consequentemente para o modelo térmico da máquina, que tem como uma das fontes de calor as perdas magnéticas.

Uma vez conhecidas as propriedades eletromagnéticas dos materiais, realiza-se a parametrização das variáveis geométricas a fim de avaliar a sensibilidade das variáveis frente aos resultados de desempenho. Seguido da análise paramétrica, pretende-se definir relações de compromisso entre as variáveis geométricas de forma a atender os requisitos de desempenho da aplicação proposta. Com essa abordagem se pretende elaborar o projeto eletromagnético das máquinas.

A fim de avaliar o desempenho do motor projetado para tracionar o carro definido no início do projeto, serão realizadas simulações computacionais em ferramenta Matlab/Simulink[®] (disponível na UFRGS) com as características do motor tracionando o carro em diferentes ciclos de condução, considerando inclusive frenagem regenerativa. Esta análise permitirá avaliar a compatibilidade do motor projetado para operação contínua e operação limite.

A modelagem das perdas magnéticas é realizada de forma analítica, considerando modelagens tradicionais, e também por meio de modelagem numérica, utilizando-se do mesmo modelo já descrito.

A análise eletromagnética da máquina operando sob condição de falha também deve ser realizada por meio de simulações numérica. A partir da simulação numérica devem ser elaborados modelos analíticos de parâmetros concentrados que permitem descrever o comportamento sob condição de falha em uma ou mais fases da máquina multifásica.

A modelagem analítica de parâmetros concentrados da máquina multifásica será desenvolvida considerando métodos tradicionais de representação de máquinas síncronas de ímãs permanentes. A determinação da constante de força eletromotriz, resistências e indutâncias síncronas também será realizada por meio de simulação eletromagnética numérica. Simulações de circuito equivalente utilizando software comercial PSIM[®] (disponível na UFRGS) serão realizadas comparando os resultados do circuito equivalente com os resultados do modelo de elementos finitos para fins de validação e refinamento.

A modelagem térmica da máquina também será realizada por meio de simulação numérica utilizando a ferramenta computacional ANSYS Fluent[®] (disponível na UFRGS). Deverá ser considerado o método de refrigeração, o líquido de arrefecimento e um projeto

mecânico inicial para realizar as simulações. Com bases no projeto eletromagnético (que define as dimensões da estrutura ativa da máquina), nas propriedades térmica dos materiais, na análise de perdas eletromagnéticas e no projeto mecânico preliminar, será possível realizar simulações térmicas. Estas devem ser realizadas para diferentes condições de carga. Para avaliar o efeito mútuo entre as variáveis eletromagnéticas e térmicas, serão realizadas simulações multifísicas, acoplando o modelo térmico e eletromagnético utilizando a ferramenta Ansys Workbench® (disponível na UFRGS). Estudos prévios conduzidos por membros da equipe mostraram que a simulação multifísica térmica-eletromagnética representa muito melhor o desempenho real de um dispositivo eletromagnético do que as análises individualizadas.

Utilizando a ferramenta computacional Solidworks® (disponível na UFRGS) será realizado o dimensionamento mecânico dos eixos, dos mancais de rolamento e dos rotores, especialmente devido ao elevado esforço mecânico axial presente nestas topologias de máquinas elétricas. Utilizando a mesma ferramenta computacional, pretende-se elaborar os desenhos mecânicos das peças constituintes da máquina a fim de executar os serviços de usinagem para a construção dos protótipos.

Para o projeto do inversor, depois de definida a topologia do circuito de potência, serão consideradas as propriedades das chaves de potência inicialmente escolhidas, com base nos requisitos de projeto e nas chaves estáticas comercialmente disponíveis. Para determinação de perdas por condução e por chaveamento será avaliado por meio de simulação numérica utilizando ferramenta de simulação de circuitos como PSIM® (disponível na UFSM). As perdas podem ser computadas para diversas condições de carga do motor.

A partir do modelo equivalente de parâmetros concentrados do motor podem ser desenvolvidas as técnicas de controle vetorial do motor multifásico. Pode-se testar e pré-validar as estratégias de controle e acionamento com simulações *hardware-in-the-loop* (utilizando a ferramenta Typhoon HIL®, disponível na UFSM), que devem ser desenvolvidas para realizar rotinas de testes automáticos e rotinas para emulação de condições reais de tráfego e acionamento da máquina elétrica.

A simulação térmica numérica do inversor deve ser realizada com base na estrutura de troca térmica definida, com base nas perdas estimadas nas chaves estáticas e com base nas propriedades térmicas dos componentes, equipamentos e fluido do sistema de troca térmico.

Para o projeto do BMS, serão realizadas simulações utilizando simuladores de circuitos eletrônicos. A ferramenta Altium Designer® (disponível na Fueltech) deve ser utilizada para projeto dos circuitos dos módulos do BMS simulando operação sob diferentes níveis de tensão, arranjos de células e sob diferentes condições de operação não ideal do sistema de baterias para avaliar a resposta dos circuitos em estudo frente às condições de operação das células das baterias.

5.4 - Fabricação de protótipos

Pretende-se montar pelo menos três protótipos de cada um dos equipamentos. Um conjunto será destinado para instalação no carro e dois para testes subsequentes nas ICTs, sendo que um deve ser destinado à UFRGS e outro à UFSM.

Para a fabricação dos protótipos do motor serão realizadas desenhos técnicos de todas as peças em SolidWorks® (disponível na UFRGS). Após serão realizadas usinagem das chapas elétricas de grão orientado ou superior orientado e dos ímãs permanentes de terras raras setoriais com máquina de eletroerosão a fio (disponível na UFRGS). Os cortes com eletroerosão a fio podem ser realizados com inclinação, permite obter uma pilha de chapas com formato trapezoidal ou setorial, necessário para a construção dos segmentos do estator dos motores. Após usinagem dos ímãs permanentes os mesmos serão magnetizados utilizando magnetizador (disponível na UFRGS). Os enrolamentos da armadura serão feitos utilizando bobinadeira (disponível na UFRGS). As demais peças estruturais serão usinadas com fresadora CNC de 4 eixos (disponível na UFSM).

Para a fabricação dos inversores e dos BMSs será realizado projeto esquemático e de layout de placa utilizando-se ferramentas computacionais como o Altium Designer® (disponível na Fueltech). As placas de circuito impresso devem ser fabricadas por empresas terceirizadas (contrapartida financeira da Fueltech). Os componentes eletrônicos devem ser soldados nas placas de circuito impresso por pessoal especializado na Fueltech. Peças para gabinetes e acessórios para sistema de refrigeração poderão ser usinados com fresadora CNC de 4 eixos (disponível na UFSM).

5.5 - Ensaios para validação experimental

Os ensaios de validação experimental devem ser realizados em três estágios.

No primeiro estágio devem ser realizados ensaios individuais dos três equipamentos. Com o motor serão conduzidos ensaios elétricos básicos para medição de resistência dos

enrolamentos (ohmímetro a 4 fios disponível no LMEAE) medição de indutâncias próprias e mútuas (ponte RLC disponível no LMEAE). Após o motor deve ser instalado em uma bancada acoplado mecanicamente com um torquímetro de eixo e alimentado eletricamente por um inversor programável (disponível no LMEAE) por meio de uma controladora em tempo real (DSPACE DS1104 a ser adquirida pelo projeto). As grandezas elétricas multifásicas devem ser medidas com um sistema de aquisição de dados (HBM Gênesis disponível no LMEAE) a temperatura deve ser monitorada por meio de sensores de instalado no motor, e a vazão do fluido de refrigeração deve ser medida com sensor (adquirido com recursos do projeto). Nesta bancada e com os equipamentos mencionados serão realizados ensaios para determinar: momento de inércia do motor e para validar os modelos de perdas magnéticas, perdas por atrito e modelo térmico.

Com o inversor serão conduzidos ensaios elétricos para verificar o funcionamento dos circuitos eletrônicos de sinal utilizando multímetro e osciloscópio (disponíveis na UFSM) de potência com cargas elétricas estáticas utilizando osciloscópio (disponível na UFSM). Na sequência serão realizados ensaios para avaliar o circuito de potência e os sensores. Para isso, serão utilizadas cargas elétricas estáticas (disponíveis na UFSM) e uma fonte de corrente contínua (disponível na UFSM). O funcionamento de todos os braços do inversor multifásico devem ser avaliados individualmente. Será avaliado o modelo térmico por meio de medição de temperatura e vazão, para condições conhecidas de carga. Também devem ser realizados testes para verificar o sistema de comunicação entre inversor e VCU (*Vehicle Central Unit*, fornecido pela Fueltech)

Com o BMS serão conduzidos ensaios elétricos para verificar o funcionamento dos circuitos eletrônicos de sinal utilizando multímetro e osciloscópio (disponíveis na Fueltech). Na sequência serão realizados avaliados o funcionamentos dos módulos individuais do BMS em conjunto com bancos de baterias (adquirido com recursos do projeto) a fim de verificar se as funcionalidades do BMS. Devem ser emuladas condições de falha nas baterias para verificar a operação de diversos módulos do BMS. Na sequência, os módulos devem ser integrados com a unidade central de processamento e testes devem ser realizados com bancos de baterias de diversos níveis de tensão. Ensaio de condições de falta correspondentes ao monitoramento de cada módulo devem ser emuladas para verificar a funcionalidade do BMS modular. Também deve ser testado o sistema de comunicação entre o BMS e a VCU (equipamento produzido pela Fueltech).

No segundo estágio o *powertrain* composto de motor, inversor, banco de baterias e BMS deve ser integrado em ambiente laboratorial. Será montada uma bancada de testes com duas

máquinas protótipo acopladas mecanicamente, onde uma deve operar como motor e outra como carga mecânica. A máquina que opera como carga mecânica deve operar como gerador injetando energia na rede elétrica e/ou dissipando a energia. Entre o acoplamento mecânico deve ser instalado um torquímetro (disponível na UFRGS). As variáveis elétrica de entrada do motor e entrada do inversor (e saída do banco de baterias) deve ser medida com um sistema de aquisição de dados (HBM Gênesis disponível no LMEAE). As variáveis de temperatura e vazão do sistema de refrigeração também podem ser monitoradas pelo sistema de aquisição de dados. Ao mesmo tempo, comunicação entre inversor e BMS com a VCU deve ser estabelecida e as variáveis elétricas, térmicas e mecânicas medidas e estimadas devem ser enviadas para a VCU. As variáveis enviadas para a VCU devem ser comparadas com as medições diretas para fins de validação e ajuste. Uma vez que todo o sistema está integrado e ajustado, serão realizados três tipos de ensaios, que são: em condições nominais, em condições de máxima potência e em condições emuladas de faltas. Os ensaios em condições nominais de operação visam avaliação da estabilidade do sistema para operação por longos períodos de tempo. Nessa condição serão avaliados: a estabilidade térmica do sistema, rendimento e a autonomia do sistema. Os ensaios de condições de máxima potência são ensaios de curta duração para avaliar os limites de operação e a atuação dos sistemas de proteção do motor, inversor e baterias. Os ensaios em condições de faltas emuladas visa avaliar o sistema de tração multifásico operando quando ocorre a perda de uma ou mais fases no motor e nos braços inversores. No motor essa falta pode ser emulada por meio da desconexão elétrica de uma ou mais fases do motor e no inversor por meio da não abertura de chaves de um ou mais braços do inversor. A partir da realização dos ensaios realizado neste estágio, serão reavaliados os limites seguros de operação.

No terceiro estágio o *powertrain* ensaiado em laboratório deverá ser instalado em um carro (adquirido com recursos do projeto). A retirada de tanque, motor à combustão e acessórios, assim como adequação e instalação do *powertrain* elétrico, será realizada por equipe da Fueltech. Os primeiros ensaios com o *powertrain* elétrico instalado no carro serão realizados de forma estática, ou seja, elevando o carro para que as rodas fiquem afastadas do chão. Nesta etapa serão realizados ajustes mecânicos e serão realizadas verificações do sistema de monitoramento e controle. Na sequência serão realizados ensaios de tração com em um dinamômetro de rolo (equipamento alugado como contrapartida econômica pela Fueltech). Nestes ensaios serão avaliados valores nominais e limites, considerando os testes de laboratórios e o sistema mecânico que acopla o *powertrain* elétrico às rodas do carro. Por fim,

serão realizados ensaios em pistas fechada para avaliar aspectos de dirigibilidade, autonomia e desempenho do *powertrain* desenvolvido. Para isso será utilizado um *datalogger* (equipamento da Fueltech) para armazenar os dados elétricos, mecânicos e térmicos.

6 - Resultados Previstos

Do ponto de vista técnico-científico e de inovação o projeto visa melhorar características de desempenho e agregar funcionalidades a equipamentos essenciais para veículos elétricos. De forma mais específica, o projeto visa melhorar rendimento e aumentar densidade de conjugado (diminuindo assim volume e massa necessária) de uma topologia de máquina que já apresenta figuras de mérito muito atrativas. Isso é feito por meio de inovações no uso de materiais, de alterações geométricas e de aumento de número de fases. A partir do aumento do número de fases, propõe desenvolver motor e inversor multifásico para agregar a funcionalidade de poder operar mesmo quando ocorre alguma falha em uma ou mais fases do motor ou do inversor, aumentando assim a robustez do sistema de tração elétrico, o que não é possível nas configurações trifásicas atualmente utilizadas. Visa ainda desenvolver um sistema de gerenciamento de energia (BMS) modular com a funcionalidade de se adequar a diversos níveis de tensão e arranjos de bancos de bateria, o que confere grande flexibilidade uma vez que pode adequar o número de módulos às características do banco de baterias, independente do arranjo ou do fabricante.

Com o desenvolvimento bem sucedido destes equipamentos e a integração dos mesmos espera-se obter um sistema de tração e gerenciamento de alto desempenho no que diz respeito: à densidade de potência, à densidade de conjugado, ao rendimento, à tolerância a falhas e à segurança.

Do ponto de vista comercial, o sistema integrado pode ser produzido e comercializado para aplicação na conversão combustão-elétrica e para sistemas de tração de novos veículos elétricos leves, pesados, ou agrícolas. O principal nicho de mercado pretendido pela empresa com atuação no setor automotivo - Fueltech S.A. - é a conversão combustão-elétrica de veículos leves e, portanto, será o principal foco neste projeto. A empresa já atua na fabricação de circuitos eletrônicos de potência e tem condições de incorporar o inversor e o BMS a sua linha de produtos. Já para a produção do motor, consideram-se duas opções: fundar uma startup para produção do equipamento ou buscar empresa nacional com interesse na fabricação para transferência da tecnologia.

Com relação à classificação do projeto quanto ao nível TRL (*Technology Readiness Level*), espera-se chegar ao patamar 7 (sete), considerando escala adotada pela União Europeia, ou seja, *System Prototype Demonstration in Operational Environment*. A justificativa para sugerir esta classificação é que ao final do projeto os componentes (protótipos) integrados serão instalados no carro e serão realizados testes em pista, isto é, o sistema desenvolvido será testado e suas funcionalidades demonstradas em ambiente operacional.

7 - Equipe Técnica

Paulo Roberto Eckert possui graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente é professor adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica e professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFRGS. É Vice-Coordenador do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) onde coordena diversos projetos. Como docente, ministra aulas principalmente nas disciplinas de máquinas elétricas, acionamento eletrônico de máquinas elétricas, conversão de energia e método de elementos finitos. Tem experiência em projeto de máquinas elétricas especiais, tanto lineares como rotativas, visando principalmente aplicação veicular. É orientador da equipe E-Power UFRGS, voltada para a competição de veículos elétricos na fórmula SAE Brasil. É autor de artigos científicos internacionais na área de dispositivos eletromagnéticos e revisor de diversos periódicos importantes na área. É membro da Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo, da IEEE Power and Energy Society e da IEEE Industrial Electronics Society. Atribuições no projeto: Coordenador o projeto. Gerir os recursos financeiros. Orientar os alunos de pós-graduação e graduação envolvidos na pesquisa. Acompanhar e supervisionar a elaboração dos modelos analíticos e numéricos, projeto eletromagnético, dimensionamento térmico e projeto mecânico do motor. Orientar a construção e confecção dos protótipos. Analisar os resultados teóricos e experimentais. Escrever, revisar e submeter publicações científicas. Elaborar o relatórios parciais e finais do projeto.

Rodrigo Padilha Vieira possui graduação em engenharia elétrica (2007) pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí), mestrado (2008) e doutorado (2012) em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Atualmente é professor adjunto no Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência e professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM. Ministra disciplinas na área de máquinas elétricas, acionamentos, conversão de

energia e controle aplicado a máquinas elétricas e conversores estáticos. Tem experiência em acionamento e controle de máquinas elétricas e controle de conversores estáticos. Tem contribuído na área de controle e métodos de estimação de estados aplicados a máquinas elétricas e conversores estáticos. É autor de artigos científicos internacionais na área de engenharia elétrica e revisor de diversos periódicos importantes na área. Tem orientado alunos de graduação, mestrado e doutorado na área de controle e acionamento de máquinas elétricas. Atribuições no projeto: Orientar os alunos de pós-graduação envolvidos na pesquisa. Acompanhar e desenvolver sistemas de acionamento e controle para a máquina de fluxo axial desenvolvida. Desenvolver e orientar alunos em simulações *hardware-in-the-loop* do *powertrain* desenvolvido. Testar experimentalmente as estratégias de controle e acionamento desenvolvidas. Analisar os resultados teóricos e experimentais. Escrever, revisar e submeter publicações científicas. Elaborar relatórios técnicos.

Evandro Claiton Goltz possui mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2012) e graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2009). Atualmente é aluno de doutorado em engenharia elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), orientado pelo coordenador geral do projeto proposto com a tese intitulada “Estudo da Máquina Elétrica de Fluxo Axial com Duplo Rotor e Armadura Segmentada”. Desde 2004 ocupa o cargo de técnico de laboratório no Centro de Tecnologia (CT) da UFSM. Atua na área de engenharia elétrica, com ênfase em máquinas elétricas, materiais magnéticos e atuadores eletromecânicos. Possui experiência em projeto de máquinas elétricas especiais, visando principalmente aplicação veicular. Atribuições no projeto: estudar as topologias de máquinas elétricas de fluxo axial, os materiais magnéticos, os sistemas elétricos com elevado número de fases. Desenvolver modelos analíticos e numéricos para o dimensionamento básico da máquina elétrica e caracterização geral de desempenho. Estimar as perdas das máquinas e realizar um estudo de troca térmica. Realizar o projeto eletromagnético e mecânico dos protótipos das máquinas. Auxiliar na construção dos protótipos das máquinas elétricas e das bancadas experimentais de laboratório. Obter e analisar os resultados experimentais em laboratório para o sistema integrado. Escrever trabalhos científicos dos resultados da pesquisa e auxiliar na elaboração de relatórios técnicos.

Igor Pasa Wiltuschnig possui mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2016) e graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2013). Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS e doutorando em engenharia elétrica do Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFRGS, com tese intitulada “Projeto e Dimensionamento de um Sistema de Tração para Veículos Elétricos”. Tem experiência na área de engenharia elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Instalações elétricas e projeto de máquinas elétricas para tração de veículos elétricos considerando características do carro e ciclos de condução. É membro de projetos de pesquisa voltados para tração veicular. Atribuições no projeto: determinar os requisitos de conjugado, potência e velocidade das máquinas elétricas para aplicação veicular. Realizar projeto para a adequação mecânica e instalação das máquinas protótipo, além do projeto de integração e instalação do acionamento à eletrônica embarcada no veículo. Realizar ensaios com baterias. Avaliar os resultados do desempenho do veículo elétrico equipado o sistema projetado tanto para os testes em laboratório com no carro.

Doutorando I possui mestrado em engenharia elétrica ou engenharia mecânica e é aluno Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFRGS. Atribuições no projeto: estudar métodos de troca térmica aplicados a máquinas elétricas. Realizar modelagem numérica de sistema de troca térmica do motor. Modelar e determinar perdas elétricas e magnéticas do motor. Realizar ensaios térmicos. Determinar os limites térmicos da máquina. Realizar ensaios térmicos com o protótipo individualmente, integrado aos demais componentes na bancada de testes e instalado no carro. Escrever artigos científicos e elaborar relatórios técnicos.

Doutorando II possui mestrado em engenharia elétrica ou engenharia mecânica e é aluno Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM. Atribuições no projeto: estudar métodos de controle vetorial aplicado à máquina YASA multifásica. Avaliar topologias de circuitos de potência para o inversor multifásico. Realizar projeto eletrônico-esquemático do inversor. Realizar simulações *hardware-in-the-loop* para validação do sistema de controle. Desenvolver métodos de injeção de harmônicas de corrente para aumentar a densidade de conjugado do motor. Realizar ensaios com o protótipo individualmente, integrado aos demais componentes na bancada de testes e instalado no carro. Escrever artigos científicos e elaborar relatórios técnicos.

Mestrando I possui graduação em engenharia elétrica ou área afim e é aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFRGS. Atribuições no projeto: realizar estudos da máquina YASA multifásica operando sob condições de falha em uma ou mais fases. Propor métodos de controle da máquina multifásica em condições de falhas. Realizar

testes no protótipo para avaliar o desempenho da máquina operando com falhas emuladas em uma ou mais fases. Avaliar a atuação do sistema de proteção sob condições de falha. Escrever artigos científicos e elaborar relatórios técnicos.

Mestrando II possui graduação em engenharia elétrica ou área afim e é aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM. Atribuições no projeto: realizar estudos e ensaios para determinação de perdas nas chaves estáticas. Especificar e simular o sistema de troca térmica do inversor. Realizar estudo para acionamento *sensorless* da máquina multifásica. Realizar ensaios com o inversor e com o sistema de acionamento. Escrever artigos científicos e elaborar relatórios técnicos.

Aluno de Iniciação Científica I graduando em engenharia elétrica ou curso afim na UFRGS. Atribuições no projeto: realizar pesquisa sobre materiais magnéticos. Realizar pesquisa de preços e solicitar orçamentos de materiais e equipamentos para o projeto do motor. Elaborar desenhos de peças mecânicas. Dar suporte na usinagem de peças e construção de protótipos. Auxiliar na realização de ensaios em laboratório e em campo. Dar suporte aos alunos de pós-graduação na análise dos resultados experimentais.

Aluno de Iniciação Científica II graduando em engenharia elétrica ou curso afim na UFRGS. Atribuições no projeto: auxiliar na programação para avaliação dos requisitos de projeto por meio da análise do carro em diversos ciclos de condução. Realizar pesquisa de preços e solicitar orçamentos de materiais e equipamentos para o projeto do BMS. Realizar programação de microcontroladores para realizar comunicação entre BMS e inversor. Auxiliar nos testes experimentais do BMS. Auxiliar nos ensaios do sistema integrado em laboratório e no carro com foco principal no BMS.

Aluno de Iniciação Científica III graduando em engenharia elétrica ou curso afim na UFSM. Atribuições no projeto: realizar pesquisa sobre componentes eletrônicos. Realizar pesquisa de preços e solicitar orçamentos de componentes para o projeto do inversor. Realizar ensaios para determinação de perdas. Fazer desenhos esquemáticos dos circuitos eletrônicos. Programar microcontroladores para implementar comunicação entre inversor VCU e BMS. Auxiliar na realização de ensaios em laboratório e em campo. Dar suporte aos alunos de pós-graduação na análise dos resultados experimentais.

Júlio Moreira possui curso técnico-profissionalizante pela Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha (2007). Atualmente é técnico de laboratório no Laboratório de

Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atribuições no projeto: fazer desenhos técnicos de peças mecânicas do protótipo do motor e operar a máquina de usinagem de eletroerosão a fio do LMEAE.

Luís Adolfo Limana Berni possui curso técnico-profissionalizante pelo Colégio Técnico Industrial Santa Maria (2009). Atualmente é técnico de laboratório Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA) da Universidade Federal de Santa Maria. Atribuições no projeto: fazer desenhos técnicos de peças mecânicas do protótipo do motor, inversor e bancadas e operar a máquina fresadora CNC 4 eixos do NAFA.

Fabiano Isoton possui graduação em Engenharia da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2009) e MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (2013). Está na Fueltech desde 2007 e tem experiência no gerenciamento de projetos de P&D na indústria eletro-eletrônica. Atribuições no projeto: vai atuar na supervisão dos projetos eletrônicos do BMS e do inversor, supervisionar as atividades relacionadas à conversão combustão-elétrica do carro, representar a empresa em reuniões e participar na elaboração de relatórios técnicos.

Designer 1 funcionário da Fueltech com graduação completa em Design de produto ou afim e experiência de 5 anos em design de produto. Atribuições no projeto: deve atuar principalmente na elaboração de desenhos técnicos de SolidWorks® e utilizar ferramentas de renderização para projetar gabinetes e estruturas para alocação dos circuitos eletrônicos projetados.

Programador 1 funcionário da Fueltech com graduação em engenharia elétrica ou afim com experiência em programação em linguagem C. Atribuições no projeto: deve atuar na programação de microcontroladores e projetos de firmware voltados para o sistema de gerenciamento de sistemas de bateria tanto dos módulos como da unidade central.

Técnico de montagem de protótipo e chicotes funcionário da Fueltech com curso técnico em eletrônica e experiência em soldagem de componentes SMD e projetos de chicotes elétricos. Atribuições no projeto: deve atuar principalmente na fabricação de placas eletrônicas do BMS e do inversor e nos projetos dos chicotes elétricos do carro.

Desenvolvedor de manual de uso funcionário da Fueltech com curso técnico ou curso superior em engenharia mecânica e experiência em geração de documentação técnica.

Atribuições no projeto: deve ser responsável por elaboração dos manuais dos equipamentos, rotinas de instrução de teste e pela elaboração de relatórios técnicos.

Programador 2 / Hardware funcionário da Fueltech com graduação em engenharia elétrica ou afim e experiência em elaboração de esquemático eletrônico com a ferramenta CAD Altium Designer. Atribuições no projeto: deve atuar na elaboração de esquemático eletrônico e de *layouts* das placas de circuito impresso, especialmente as que requerem alta dissipação térmica como a do inversor. Deve atuar nos projetos de dos circuitos eletrônicos e de potência.

Projetista de bateria funcionário da Fueltech com graduação engenharia mecânica, eletrônica ou química com conhecimento em químicas de baterias. Atribuições no projeto: deve atuar nos estudos das células, especificação, manipulação e testes de banco de baterias. Deve ainda conduzir testes seguros com o sistema de gerenciamento de baterias.

Projetista mecânico / Gabinete funcionário da Fueltech com graduação em engenharia mecânica ou design de produto e experiência em modelagem e projeto de peças mecânicas em SolidWorks®. Atribuições no projeto: deve atuar em projetos de peças mecânicas e elaborar desenhos técnicos para conversão combustão-elétrica do carro e para o projeto mecânico dos gabinetes.

Técnico mecânico funcionário da Fueltech com curso técnico em mecânica automotiva ou cursando engenharia. Atribuições no projeto: deve atuar na montagem, desmontagem e adaptação mecânica do carro a ser convertido de combustão para elétrico.

8 - Plano de Trabalho

A execução do projeto proposto será de acordo com as atividades descritas detalhadamente na Tabela 2. Destaca-se que o cronograma é apresentado por trimestre, onde, por exemplo, T1 representa o primeiro trimestre do Ano 1. Destaca-se ainda que as atividades estão classificadas em: atividades conjuntas (desenvolvidas pelas três instituições que propõe o projeto ou por duas), atividade do BMS (relacionadas ao desenvolvimento do BMS), atividades do inversor (relacionadas ao desenvolvimento do inversor) e atividades do motor (relacionadas ao desenvolvimento do motor).

Tabela 2 – Cronograma para a execução das atividades.

	Atividades	ANO 1				ANO2				ANO 3			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Atividades Conjuntas	1.1 Seleção de bolsistas para o projeto	X		X									
	1.2 Avaliação de um carro a ser convertido de combustão para elétrico	X											
	1.3 Dimensionamento do <i>powertrain</i> com base em ciclos de condução	X											
	1.4 Elaboração de relatórios técnicos trimestrais	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	1.5 Dimensionamento e especificação do <i>packs</i> de baterias		X										
	1.6 Pesquisa de preços e aquisição dos <i>packs</i> de baterias					X							
	1.7 Pesquisa de preços e aquisição do carro e de peças para realizar a conversão combustão-elétrica							X	X				
	1.8 Projeto mecânico para conversão do sistema de tração do carro								X	X	X		
	1.9 Projeto de integração/comunicação da VCU (<i>vehicle central unit</i>), BMS e inversor								X	X			
	1.10 Preparação do veículo para conversão combustão-elétrica									X	X		
	1.11 Integração do <i>powertrain</i> elétrico com motor-inversor-baterias e BMS em laboratório									X			
	1.12 Ensaios do <i>powertrain</i> elétrico em condições nominais de operação									X	X		
	1.13 Ensaios em condições limite de operação para verificação da atuação do sistema de proteção										X		
	1.14 Ensaios do <i>powertrain</i> elétrico sob condições de falha emulada no motor e no inversor										X		
	1.15 Instalação do <i>powertrain</i> elétrico no carro										X		
	1.16 Elaboração de relatórios de testes e de desempenho individual dos componentes										X	X	
	1.17 Elaboração de relatórios de testes e de desempenho do sistema integrado testado em laboratório										X	X	
	1.18 Ensaios estáticos do <i>powertrain</i> elétrico instalado no carro											X	
	1.19 Ensaios em pista do carro elétrico convertido											X	
	1.20 Análise técnica dos dados do <i>powertrain</i> no carro frente ao desempenho do carro à combustão											X	X
	1.21 Elaboração de relatórios de testes em campo com o <i>powertrain</i> instalado no carro											X	X
	1.22 Análise dos aspectos econômicos do <i>powertrain</i> desenvolvido e da possibilidade de produção em escala												X
	1.23 Análise do potencial de comercialização dos componentes individuais e do sistema integrado												X
	1.24 Elaboração dos relatórios finais do projeto												X
Atividades do BMS	2.1 Definição de estratégia de modularização de BMS	X	X										
	2.2 Desenvolvimento de hardware do BMS modular	X	X	X	X								
	2.3 Projeto do gabinete do BMS modular	X	X	X	X	X	X						
	2.4 Estudo e projeto dos chicotes para o BMS		X	X		X	X						
	2.5 Pesquisa de preços, orçamentos e compras de materiais para protótipos do BMS		X	X	X	X							
	2.6 Definição das funcionalidades do BMS modular		X	X									
	2.7 Desenvolvimento de firmware do BMS modular		X	X	X	X							
	2.8 Testes em bancada do BMS integrado					X	X						
	2.9 Desenvolvimento de giga de testes para ensaios de produção do BMS						X	X	X	X			
	2.10 Elaboração de relatórios técnicos e de manuais do BMS.						X	X	X				
	2.11 Ensaios de laboratórios de condições de falha emuladas nas baterias para verificar atuação do BMS							X	X				
Atividades do Inversor	3.1 Estudo e definição da topologia de potência do inversor multifásico	X	X										
	3.2 Estudo e definição das chaves estáticas de potência do inversor		X										
	3.3 Pesquisa de preços, orçamentos e compras de componentes eletrônicos para protótipos do inversor		X	X			X						

	3.4 Implementação de modelo numérico do circuito de potência do inversor		X																
	3.5 Projeto preliminar do circuito de potência do inversor		X	X															
	3.6 Estudo e definição do método de troca térmica do inversor			X	X														
	3.7 Modelagem e análise de perdas por condução e chaveamento do inversor com injeção de harmônicas de corrente			X	X														
	3.8 Realização de ensaios para determinação de perdas nas chaves estáticas			X	X														
	3.9 Desenvolvimento do sistema de controle vetorial <i>sensorless</i> do motor multifásico com injeção de harmônicas		X	X	X	X	X	X	X										
	3.10 Desenvolvimento de modelo térmico numérico parametrizado do inversor					X													
	3.11 Projeto eletrônico - esquemático e de layout de placa do inversor com troca térmica					X	X	X											
	3.12 Desenvolvimento de software de configuração e de protocolos de comunicação do inversor e de controle do inversor					X	X	X	X										
	3.13 Refinamento do projeto do inversor considerando troca térmica para condição e operação nominal						X												
	3.14 Estudo os limites de operação elétricos e térmicos do inversor						X	X											
	3.15 Fabricação dos protótipos do inversor								X										
	3.16 Definição e execução de rotinas de testes para validação do modelo térmico do inversor									X									
	3.17 Refinamento de modelo analítico de parâmetros concentrados do motor e do controle vetorial												X						
	3.18 Refinamento do modelo térmico do inversor e reavaliação dos limites de operação impostos por temperatura												X						
	3.19 Dimensionamento e projeto do sistema de proteção elétrico do inversor												X	X					
Atividades do Motor	4.1 Estudo e definição dos materiais magnéticos do motor	X																	
	4.2 Estudo e definição do método de troca térmica do motor	X	X																
	4.3 Pesquisa de preços, orçamentos e compras de materiais para protótipos do motor		X				X												
	4.4 Implementação de modelo eletromagnético numérico parametrizado do motor		X	X															
	4.5 Modelagem e análise de perdas elétricas e magnéticas do motor com injeção de harmônicas de corrente		X	X	X														
	4.6 Projeto eletromagnético e dimensional preliminar do motor multifásico		X	X															
	4.7 Estudo e análise da injeção, pelo inversor, de harmônicas de corrente no motor		X	X	X	X													
	4.8 Realização de ensaios de caracterização magnética dos materiais do motor			X	X														
	4.9 Desenvolvimento e validação com modelo numérico do modelo dinâmico de parâmetros concentrados do motor			X	X	X													
	4.10 Análise do desempenho do motor multifásico sob diferentes ligações elétricas entre fases			X	X	X	X												
	4.11 Desenvolvimento de modelo térmico numérico parametrizado do motor					X													
	4.12 Desenho mecânico das peças do motor					X	X												
	4.13 Estudo dos limites de operação eletromagnéticos e térmicos do motor					X	X	X											
	4.14 Simulação do desempenho do <i>powertrain</i> projetado para tracionar o carro a ser convertido					X	X	X	X										
	4.15 Refinamento do projeto do motor considerando troca térmica para condição e operação nominal						X												
	4.16 Análise da operação do <i>powertrain</i> sob falhas elétricas no motor ou no inversor						X	X	X	X									
	4.17 Projeto mecânico e térmico integrado do motor						X	X											
	4.18 Usinagem das peças dos protótipos do motor						X	X											
	4.19 Projeto e montagem da bancada de testes em laboratório do <i>powertrain</i> elétrico desenvolvido						X	X											
	4.20 Fabricação dos protótipos do motor							X											
	4.21 Definição e execução de rotinas de testes para validação do modelo analítico de parâmetros concentrados do motor									X									
	4.22 Definição e execução de rotinas de testes para validação do modelo térmico do motor									X									
	4.23 Refinamento do modelo térmico do motor e reavaliação dos limites de operação impostos por temperatura												X						
	4.24 Dimensionamento do sistema de proteção elétrica do motor												X	X					

Na Tabela 3 é apresentado uma lista de metas anuais a serem atingidas e os orçamentos correspondentes, também classificadas de acordo com as quatro atividades, isto é: atividades conjuntas, atividade do BMS, atividades do inversor e atividades do motor.

Tabela 3 – Metas pretendidas ao final de cada ano e orçamento estimado por meta e atividades.

	Ano 01		Ano 02		Ano 03	
	Metas	Orçamento estimado	Metas	Orçamento estimado	Metas	Orçamento estimado
Atividades conjuntas	- Selecionar bolsistas; - Selecionar carro; - Determinar requisitos do powertrain; - Dimensionar o banco de baterias;	118.805,67	- Adquirir as baterias; - Adquirir o carro;	255.392,98	- integrar os equipamentos em laboratório; - instalar o <i>powertrain</i> desenvolvido no carro; - ensaiar condições nominais, limites e de falta em laboratório; - confirmar que o <i>powertrain</i> desenvolvido apresenta as características de desempenho pretendidas em laboratório e no instalado no carro;	137.266,34
Atividades do BMS	- Definir as estratégias de modularização e as funcionalidades do BMS; - Obter o projeto de hardware do BMS; - Adquirir materiais para confecção de protótipos do BMS;	133.596,34	- Projetar os chicotes para integrar o BMS no carro; - Finalizar o projeto do firmware do BMS; - Finalizar o projeto do gabinete e de embalagem para o BMS; - Finalizar o projeto dos chicotes do BMS; - Testar e validar o BMS em bancada.	106.096,34	- Desenvolver e validar giga de teste para o BMS;	106.096,34
Atividades do inversor	- Definir a topologia do circuito de potência multifásico; - Adquirir componentes para fabricação dos protótipos; - Elaborar o projeto do circuito eletrônico do inversor; - Definir o sistema de troca térmica; - Modelar e determinar perdas do circuito de potência.	176.879,56	- Finalizar o sistema de controle vetorial <i>sensorless</i> multifásico; - Fabricar os protótipos do inversor; - Realizar ensaios em laboratório com o inversor; - Desenvolver método de comunicação do inversor com a VCU.	137.496,34	- Elaborar o sistema de proteção do inversor e do motor; - Desenvolver giga de teste para o inversor;	106.096,34
Atividades do motor	- Definir o sistema de troca térmica; - Definir e adquirir materiais magnéticos para os protótipos; - Elaborar o projeto dimensional preliminar com base no modelo numérico parametrizado; - Realizar ensaios de caracterização eletromagnéticas e modelar perdas.	243.089,42	- Desenvolver e validar o modelo dinâmico com injeção de harmônicas de corrente; - Analisar o desempenho do motor sob condições de falta em fases; - Realizar o projeto mecânico e de troca térmica; - Fabricar os protótipos.	184.996,34	- Realizar ensaios em laboratório com o motor a fim de refinar modelos; - Determinar em laboratório condições normais e limites de operação; - Definir condições para proteção elétrica do motor;	110.396,34
Total (R\$)		672.370,99		683.83.982,01		459.855,37
Total Geral (R\$)		1.816.208,36				

9 - Orçamento detalhado

Na Tabela 4 é apresentado o orçamento detalhado do projeto onde é apresentada a descrição dos itens, o valor correspondente, a fonte pagadora (identificando se é **aporte** financeiro ou **contrapartida** econômica) e a justificativa para o investimento.

Tabela 4 – Orçamento detalhado.

Descrição	Valor (R\$)	Fonte	Justificativa
Bolsas Acadêmicas	298.800,00	FUNDEP - Aporte	Pagamento de 2 bolsistas de doutorado e 3 de graduação durante 36 meses.
Bolsas de Incentivo à Inovação	194.400,00	FUNDEP - Aporte	Pagamento de bolsa de incentivo para os coordenadores e para dois pesquisadores com experiência em pesquisa na área.
Insumos Máquina Eletroerosão a Fio	22.500,00	FUNDEP - Aporte	Fio, filtros, resina, e bicos para funcionamento da máquina de eletroerosão a fio para usinagem de peças dos protótipos do motor.
Insumos e materiais para usinagem	40.000,00	FUNDEP - Aporte	Peças de reposição, fresas, material de consumo como aço e alumínio para fabricação dos protótipos.
Material para fabricação dos motores	37.000,00	FUNDEP - Aporte	Chapas, ímãs, rolamentos, aço austenítico, alumínio, isolantes, fios esmaltados, tekapeek, matex, etc. para fabricação dos protótipos do motor.
Componentes e insumos do sistema de refrigeração	28.000,00	FUNDEP - Aporte	Componentes como motor e bomba, líquido de arrefecimento, mangueiras, válvulas, radiador para o sistema de refrigeração do motor e inversor.
Packs de bateria	80.100,00	FUNDEP - Aporte	Banco de baterias para testes do BMS, do powertrain integrado em bancada e para instalação no carro.
Sensores de temperatura e vazão	6.000,00	FUNDEP - Aporte	Medir temperatura e vazão do fluido de refrigeração no motor e no inversor.
Placa de circuito impresso para inversores	10.000,00	FUELTECH - Aporte	Placas de circuito impresso para fabricação dos protótipos do inversor.
Stêncil para inversores	3.600,00	FUELTECH - Aporte	Stêncil para giga de testes e montagem das placas eletrônicas do inversor.
Placa de circuito impresso para BMS	6.000,00	FUELTECH - Aporte	Componentes analógicos, conectores, fixadores para construção dos protótipos do BMS.
Stêncil para BMS	3.600,00	FUELTECH - Aporte	Stêncil para giga de testes e montagem das placas eletrônicas do BMS.
Material gabinete do BMS	5.000,00	FUELTECH - Aporte	Material para confecção de gabinetes do BMS desenvolvido.
Placa de circuito impresso para giga de teste do BMS	3.000,00	FUELTECH - Aporte	Placas de circuito impresso para fabricação de gigas de teste do BMS.
Stêncil para giga de teste do BMS	1.600,00	FUELTECH - Aporte	Stêncil para giga de testes e montagem das placas eletrônicas do BMS.
Chicotes	800,00	FUELTECH - Aporte	Chicotes para conexão elétrica entre os dispositivos no carro.
Peças para carro	15.000,00	FUELTECH - Aporte	Peças mecânicas e elétricas para adaptar o carro e viabilizar a conversão combustão-elétrica.
Insumos principais par inversores multifásicos	25.152,68	FUNDEP - Aporte	Chaves estáticas de carbeto de silício, gate driver, fonte regulada, amplificadores, etc para fabricação dos protótipos dos inversores. Justificativa para importação: componentes de fabricação americana e possibilidade de redução de custo total por meio de isenção de imposto de importação por parte da ICT. Valor do orçamento: 4382 USD. Taxa de câmbio considerada em 19/05/20 de 1 USD = R\$ 5,74.
Insumos secundário para inversores	7.000,00	FUELTECH - Aporte	Componentes eletrônicos para construção dos protótipos dos inversores com diodos, resistores, capacitores, optoacopladores, etc. Justificativa para importação: a maioria dos componentes são de fabricação estrangeira e a empresa já faz regularmente importação de itens semelhantes. Valor do orçamento: 1215 USD. Taxa de câmbio considerada em 19/05/20 de 1 USD = R\$ 5,74.
Insumos para BMS	5.000,00	FUELTECH - Aporte	Componentes analógicos, conectores, fixadores para construção dos protótipos do BMS. Justificativa para importação: a maioria dos componentes são de fabricação estrangeira e a empresa já faz regularmente importação de itens semelhantes. Valor do orçamento: 870 USD. Taxa de câmbio considerada em 19/05/20 de 1 USD = R\$ 5,74.
Manutenção máquina eletroerosão a fio	12.900,00	FUNDEP - Aporte	Realizar revisão e manutenção da máquina de eletroerosão a fio que realizará os cortes de peças como estator e ímãs dos protótipos dos motores.
Manutenção máquina	10.000,00	FUNDEP -	Realizar revisão e manutenção da máquina da CNC 4 eixos que realizará a

fresadora CNC 4 eixos		Aporte	usinagem de peças para os motores como carcaça, eixos, estrutura e peças para bancadas de teste.
Despesas Acessórias de Importação	10.869,86	FUNDEP – Aporte	Serviços de transportes e impostos sobre importação de material permanente e de consumo.
Locação de dinamômetro	7.200,00	FUELTECH - Aporte	Dinamômetro para ensaios do carro elétrico convertido.
Renovação licença SolidWorks	6.870,00	FUNDEP – Aporte	Renovação por 3 anos de licenças para software especializado em desenhos de peças mecânicas e simulações de esforços mecânicos dos protótipos e das bancadas.
Renovação licença Ansys	43.193,08	FUNDEP – Aporte	Renovação por 3 anos de licenças para software especializado em desenhos de peças mecânicas e simulações de esforços mecânicos dos protótipos e das bancadas.
Carro	40.000,00	FUNDEP – Aporte	Carro à combustão para conversão à elétrico para realização de ensaios estáticos e dinâmicos do <i>powertrain</i> desenvolvido.
Controladora Tempo Real Dspace DS1104	29.196,64	FUNDEP – Aporte	Controle e monitoramento do BMS, inversor e motor em nível de prototipagem. Justificativa para importação: equipamento de fabricação alemã e possibilidade de redução de custo total por meio de isenção de imposto de importação por parte da ICT. Valor do orçamento: 4662 euros. Taxa de câmbio considerada em 19/05/20 de 1 EU = R\$ 6,26.
Homem-hora de Gerente de P&D - Fabiano Isoton	76.180,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com formação em engenharia da computação, gerente de projetos, funcionário da Fueltech. Deve atuar na supervisão dos projetos eletrônicos do BMS e do inversor. Também deve supervisionar as atividades relacionadas à conversão combustão-elétrica do carro.
Homem-hora Designer 1	27.900,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com graduação completa em Design de produto ou afim que atua em modelagem de gabinetes, funcionário da Fueltech. Deve atuar principalmente na elaboração de desenhos técnicos de SolidWorks e utilizar ferramentas de renderização para projetar gabinetes e estruturas.
Homem-hora Programador 1	62.560,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com graduação em engenharia elétrica ou afim, funcionário da FuelTech. Deve atuar programação em linhagem C e projetos de firmware voltados para o gerenciamento de sistemas de bateria.
Homem-hora Técnico de Montagem de protótipo e Chicotes	8.000,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com curso técnico em eletrônica, funcionário da Fueltech. Deve atuar principalmente na fabricação de placas eletrônicas, soldagem de componentes SMD e nos projetos de chicotes elétricos.
Homem-hora Desenvolver de Manual de uso	4.100,00	FUELTECH – Contrapartida	Homem-hora de profissional com curso técnico ou superior em engenharia mecânica, funcionário da FuelTech. Deve ser responsável por elaboração dos manuais dos equipamentos e pela elaboração de relatório técnicos.
Homem-hora Programador 2 / Hardware	102.480,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com graduação em engenharia elétrica ou afim, funcionário da FuelTech. Deve atuar na elaboração de esquemático eletrônico e de layouts das placas de circuito impresso, especialmente as que requerem alta dissipação térmica. Deve atuar nos projetos de dos circuitos eletrônicos de potência.
Homem-hora Projetista de bateria	77.750,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com graduação em engenharia mecânica, eletrônica ou químico, funcionário da Fueltech. Deve atuar nos estudos das células, especificação, manipulação e testes de baterias. Deve conduzir testes seguros com o sistema de gerenciamento de baterias.
Homem-hora Projetista mecânico / Gabinete	88.100,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com graduação em engenharia mecânica ou design de produto, funcionário da Fueltech. Deve atuar em projetos de peças mecânicas para o carro e gabinetes. Deve elaborar de desenhos técnicos.
Homem-hora Técnico mecânico	56.880,00	FUELTECH - Contrapartida	Homem-hora de profissional com curso técnico em mecânica automotiva ou cursando engenharia, funcionário da FuelTech. Deve atuar na montagem, desmontagem e adaptação mecânica do carro a ser convertido de combustão para elétrico.
VCU - Vehicle Control Unit	8.970,00	FUELTECH - Contrapartida	Equipamento eletrônico central do carro para monitoramento e controle do carro elétrico. Como os equipamento serão instalados pela Fueltech, definiu-se destinação Fueltech.
Horas-Homem Prof. Paulo Eckert	35.177,76	UFRGS - Contrapartida	Homem-hora adicional do coordenador geral do projeto. Serão 5 horas de atuação no projeto remunerados com bolsa e 3 horas semanais (durante 3 anos) como contrapartida. O valor considerado por HH é baseado no salário bruto no momento da submissão. Serão horas semanais dedicadas ao projeto.
Horas-Homem Prof. Rodrigo Vieira	40.176,00	UFMS - Contrapartida	Homem-hora adicional do coordenador substituto do projeto. Serão 5 horas de atuação no projeto remunerados com bolsa e 3 horas semanais (durante 3 anos) como contrapartida. O valor considerado por HH é baseado no salário bruto no momento da submissão. Serão 8 horas semanais dedicadas ao projeto.
Horas-máquina	43.200,00	UFRGS -	Horas de usinagem da máquina de eletroerosão a fio disponível na UFRGS

eletroerosão a fio		Contrapartida	que será usada para fabricação dos protótipos do motor.
Horas-máquina fresadora CNC 4 eixos	28.800,00	UFSM - Contrapartida	Horas de usinagem do CNC 4 eixos disponível na UFSM que será usado para fabricação de peças para os protótipos do motor, do inversor e de peças para bancada de testes.
Horas-homem técnico máquina eletroerosão a fio	8.160,00	UFRGS - Contrapartida	Homem-hora do técnico mecânico Júlio Moreira, operador da máquina de usinagem de eletroerosão a fio na UFRGS. O valor de HH foi estimado com base no salário bruto do técnico.
	5.760,00	UFSM - Contrapartida	Homem-hora do técnico mecânico Luís Adolfo Limana Berni, operador do CNC 4 eixos na UFSM. O valor de HH foi estimado com base no salário bruto do técnico.
Bolsa Mestrando I	36.000,00	UFRGS - Contrapartida	Mestrando remunerado por órgãos de fomento na UFRGS e orientado pelo coordenador geral. Deve atuar principalmente na avaliação da operação do motor operando sob condições de falha.
Bolsa Mestrando II	36.000,00	UFSM - Contrapartida	Mestrando remunerado por órgãos de fomento na UFSM e orientado pelo coordenador substituto. Deve atuar principalmente na metodologia de acionamento sem sensores.
Taxa administrativa e de uso de instalações na UFRGS	67.604,86	FUNDEP – Aporte	Taxa administrativa para a fundação FEENG que deve gerenciar os recursos na Universidade e taxa de uso das instalações da mesma.
Taxa administrativa e de uso de instalações na UFSM	47.127,48	FUNDEP – Aporte	Taxa administrativa para a fundação FATEC que deve gerenciar os recursos na UFSM e taxa de uso das instalações da universidade.

Na Tabela 5 é apresentado de forma resumida o orçamento do projeto.

Tabela 5 – Orçamento resumido do projeto.

Instituição	Aporte Financeiro (R\$)	Contrapartida Econômica (R\$)	Total (R\$)
FUNDEP	999.714,60	0,00	999.714,60
UFRGS	0,00	122.537,76	122.537,76
UFSM	0,00	110.736,00	110.736,00
FUELTECH	70.300,00	512.920,00	583.220,00
Total (R\$)	1.070.014,60	746.193,76	1.816.208,36

Referências Bibliográficas

- B. Bilgin *et al.*, "Making the Case for Electrified Transportation," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 1, pp. 4-17, June 2015.
- IEA (2019), Global EV Outlook 2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
- MAGNAX BVBA. Yokeless Axial Flux PM Motor Technology. Disponível em: <https://www.magnax.com/technology>. Acesso em 01/05/2020.
- WEG S.A. Motores Trifásico de Uso Geral. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/W22-IR3-Premium/W22-IR3-Premium-100-cv-2P-250S-M-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B14D/p/12996088> Acesso em: 01/05/2020.
- M. Zhang, P. Suntharalingam, Y. Yang, and W. Jiang, "Fundamentals of hybrid electric powertrains," in *Advanced Electric Drive Vehicles*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- PARSA, L. "On advantages of multi-phase machines", IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), v. 2005, p. 1574–1579, 2005
- ZHU, Z.Q.; HOWE, D., "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol.95, no.4, pp.746,765, April 2007.
- WOOLMER, T. J. J.; MCCULLOCH, M. D. Axial flux permanent magnet machines: a new topology for high performance applications. IET Hybrid Vehicle Conference 2006.
- T. J. Woolmer and M. D. McCulloch, "Analysis of the yokeless and segmented armature machine," *Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2007*, vol. 1, pp. 704–708, 2007.