



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA – PPGEL**

**ASSOCIAÇÃO AMPLA ENTRE A UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SÃO JOAO DEL-REI (UFSJ) E O CENTRO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS (CEFET-MG)**

**RELATÓRIO DE PROJETOS ATIVOS (2021-2024)**

**Instituição – CEFET-MG**

**Coordenador: Prof. Dr. Miguel de Brito Guimarães Neto (CEFET-  
MG)**

**Coordenador Adjunto: Prof. Dr. Wesley Peres (UFSJ)**

## **DOCUMENTO DE PUBLICAÇÃO**

Publica-se o relatório contendo os projetos financiados por agências de fomento no âmbito do PPGEL no CEFET-MG, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

Prof. Dr. Wesley Peres

Coordenador Adjunto do PPGEL – UFSJ/CEFET-MG

**PROJETO 01**

**Título:** Caracterização e avaliação de potencialidades de aços elétricos para aplicações de eletrônica de potência

**Vigência:** 2023 – 2024

**Chamada/Agência/Financiador:** APERAM INOX AMERICA DO SUL S.A.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino

Prof. Heverton Augusto Pereira (Coordenador)

JDP. Erick Matheus da Silveira Brito

Discente: João Victor França

Egresso: Diuary Gonçalves

**Descrição:**

A realização deste projeto prevê os seguintes produtos e resultados: 1. Setup de caracterização de aços elétricos para aplicações em eletrônica de potência. 2. Obtenção de um modelo de perdas (por exemplo, baseado em parâmetros de Steinmetz generalizados) para os materiais considerando as frequências de operação e o nível de excitação CC (medido em termos de intensidade de campo Hdc). 3. Comparação das perdas obtidas no aço elétrico com materiais empregados em conversores eletrônicos, como núcleos de ferrite, de materiais amorfos, de ligas metálicas, de pó de ferro e de materiais nanocristalinos. 4. Realização de testes de indutores baseados no aço ensaiado em um conversor eletrônico.

## **PROJETO 02**

**Título:** PD D0727 - Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV FASE II

**Vigência:** 2023 – 2024

**Chamada/Agência/Financiador:** XXXXXXXX

**Captação:** Não Informada.

### **Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino

Prof. Heverton Augusto Pereira

### **Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Wallace Boaventura (Coordenador)

### **Descrição:**

Esse projeto é uma continuação do projeto D0722, que tem por objetivo estabelecer um roadmap para implantação de SAEBs (Sistemas de Armazenamento de Energia por Bateria) em alimentadores críticos da CEMIG, integrados às práticas e sistemas operacionais do COD, consolidando e expandindo os resultados alcançados na fase anterior do projeto. Destaca-se a instalação e monitoramento no campus da UFMG de SAEBs que utilizam tecnologias de armazenamento diferentes: SAEB-1, a tecnologia de íons de Lítio, armazenamento de energia de 1 MWh e potência de 750 kVA; SAEB-2, a tecnologia de Chumbo Carbono (PbC), 750 kWh de energia e 400 kVA de potência. A implantação e acompanhamento desses sistemas permitirá uma plataforma polivalente para estudos.

**PROJETO 03**

**Título:** Bat2Grid: Desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia inteligentes baseados em baterias de segunda vida

**Vigência:** 2023 – Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** XXXXXXXX

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino  
Prof. Heverton Augusto Pereira (Coordenador)  
Prof. Marcelo Martins Stopa  
JDP Erick Matheus da Silveira Brito  
Discente João Victor França  
Discente Pedro Ivo de Oliveira Tironi  
Egresso Rodrigo Cássio de Barros  
Egressa Dayane do Carmo Mendonça  
Egressa Renata Oliveira de Sousa

**Integrantes Internacionais:**

Remus Teodorescu

**Descrição:**

Os sistemas de armazenamento de energia por baterias (SAEB) têm se tornado cada vez mais importantes para o sistema elétrico de potência (SEP), provendo serviços auxiliares que beneficiam tanto às distribuidoras quanto ao cliente final. Uma grande motivação para o uso de SAEB no SEP vem do crescimento do setor de mobilidade elétrica. De fato, as baterias empregadas nos veículos elétricos são descartadas quando atingem em torno de 70 a 80 da sua capacidade inicial. Desta forma, existe um potencial de utilização das chamadas baterias de segunda vida em SAEB. Neste caso, o banco de baterias do veículo é desmontado e as baterias passam por uma triagem. Ainda que seja realizada uma classificação das baterias, espera-se que as suas capacidades e impedâncias sejam diferentes. Portanto, a associação de baterias de segunda vida é desafiadora, assim como o balanceamento de estados de carga e de saúde. Neste contexto, o projeto Bat2grid propõe o desenvolvimento de uma bateria inteligente, que é a integração de uma bateria de segunda vida e um conversor eletrônico, além de desenvolver um arranjo de baterias inteligentes compatível com unidades de conversão de potência comerciais, possibilitando o retrofit dos sistemas atuais e facilitando a inserção desta tecnologia no mercado. A proposta inclui a implementação de métodos

de prognóstico e tolerância a falhas, aumentando a confiabilidade do SAEB. Além disso, será implementada uma metodologia de carga e descarga das baterias com corrente pulsada, o que permite estender a vida útil destas. As hipóteses serão validadas por meio de um protótipo empregando baterias inteligentes e uma unidade de conversão de potência comercial. Por fim, serão avaliados os mercados mais promissores para a aplicação desta tecnologia, tendo em vista os diferentes níveis de potência/energia e serviços no sistema elétrico. Espera-se que este projeto contribua para o domínio da tecnologia de armazenamento de energia baseado em baterias de segunda vida.

### **PROJETO 04**

**Título:** Rede de pesquisa internacional em sistemas de armazenamento de energia por baterias inteligentes

**Vigência:** 2023 – Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino  
Prof. Heverton Augusto Pereira (Coordenador)  
JDP Erick Matheus da Silveira Brito  
Prof. Marcelo Martins Stopa  
Discente Pedro Ivo de Oliveira Tironi  
Egresso Rodrigo Cássio de Barros  
Egressa Renata Oliveira de Sousa  
Egressa Dayane do Carmo Mendonça

**Integrantes Internacionais:**

Remus Teodorescu

**Descrição:**

O sistema elétrico de potência moderno é caracterizado por uma alta inserção de fontes renováveis, sobretudo usinas fotovoltaicas (FV) e eólicas. A intermitência destas fontes resulta em problemas na qualidade de energia relacionados a regulação de tensão e distorção harmônica. Assim, dispositivos de suporte e controle do sistema elétrico tornam-se fundamentais para uma matriz energética renovável. Dentre as diversas soluções existentes no mercado, os sistemas de armazenamento de energia por baterias (SAEB) destacam-se por prover serviços auxiliares que beneficiam o operador, a distribuidora e o cliente final. Contudo, a arquitetura tradicional de SAEB apresenta desvantagens. Como as baterias são normalmente conectadas em série, estas são carregadas/descarregadas pela mesma corrente. Isto requer que as baterias sejam similares (mesma capacidade e tecnologia), dificultando a utilização de baterias de segunda vida provenientes do mercado de mobilidade elétrica. Além disso, a falha em uma única bateria pode comprometer a operação do SAEB como um todo. Portanto, esta rede de pesquisa tem quatro objetivos: 1) propor arquiteturas de conversores de potência e estratégias de controle alternativas que permitam a utilização de baterias de segunda vida ou de tecnologia diferente no mesmo SAEB; 2) investigar como os sistemas de armazenamento podem auxiliar na melhoria

da qualidade da energia considerando as características do sistema elétrico de potência brasileiro; 3) investigar como os diferentes serviços auxiliares afetam a degradação das baterias e conversores e como controlar em tempo real está degradação; 4) desenvolver uma ferramenta de dimensionamento que considere os custos de capital e custos operacionais do SAEB. A validação será realizada por meio de plataforma experimental e simulações em tempo real em uma plataforma hardware-in-the-loop (HIL). Espera-se com este projeto contribuir para a colaboração interacional entre instituições brasileiras e dinamarquesas, afim de alcançar o domínio da tecnologia de armazenamento de energia por baterias, que é um setor estratégico para impulsionar o desenvolvimento do setor elétrico no Brasil.

## **PROJETO 05**

**Título:** Rede mineira de pesquisa e desenvolvimento em sistemas de armazenamento de energia por baterias

**Vigência:** 2023 – Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

### **Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino (Coordenador)

Prof. Heverton Augusto Pereira

JDP Erick Matheus da Silveira Brito

Prof. Marcelo Martins Stopa

Discente Pedro Ivo de Oliveira Tironi

Discente João Victor França

Egresso Rodrigo Cássio de Barros

Egressa Renata Oliveira de Sousa

Egressa Dayane do Carmo Mendonça

Egresso Diuary Gonçalves

### **Integrantes Internacionais:**

Remus Teodorescu

### **Descrição:**

O sistema elétrico de potência moderno é caracterizado por uma alta inserção de fontes renováveis, sobretudo usinas fotovoltaicas (FV) e eólicas. A intermitência destas fontes resulta em problemas na qualidade de energia relacionados a regulação de tensão e distorção harmônica. Assim, dispositivos de suporte e controle do sistema elétrico tornam-se fundamentais para uma matriz energética renovável. Dentre as diversas soluções existentes no mercado, os sistemas de armazenamento de energia por baterias (SAEB) destacam-se por prover serviços auxiliares que beneficiam o operador, a distribuidora e o cliente final. Contudo, a arquitetura tradicional de SAEB apresenta desvantagens. Como as baterias são normalmente conectadas em série, estas são carregadas/descarregadas pela mesma corrente. Isto requer que as baterias sejam similares (mesma capacidade e tecnologia), dificultando a utilização de baterias de segunda vida provenientes do mercado de mobilidade elétrica. Além disso, a falha em uma única bateria pode

comprometer a operação do SAEB como um todo. Portanto, esta rede de pesquisa tem quatro objetivos: 1) propor arquiteturas alternativas em conversores de potência que permitam a utilização de baterias de segunda vida ou de tecnologia diferente no mesmo SAEB; 2) investigar como os sistemas de armazenamento podem auxiliar na melhoria da qualidade da energia considerando as características do sistema elétrico de potência brasileiro; 3) investigar como os diferentes serviços auxiliares afetam a degradação das baterias e conversores; 4) desenvolver uma ferramenta de dimensionamento que considere os custos de capital e custos operacionais do SAEB. A validação será realizada por meio de plataforma experimental e simulações em tempo real em uma plataforma hardware-in-the-loop (HIL). Espera-se com este projeto contribuir para o domínio da tecnologia de armazenamento de energia por baterias, que é estratégico para impulsionar o desenvolvimento do setor em Minas Gerais..

**PROJETO 06**

**Título:** Proposta de um Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias Baseado em Conversores Modulares Multinível

**Vigência:** 2021-2024

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino (Coordenador)

Prof. Heverton Augusto Pereira

Prof. Marcelo Martins Stopa

Egressa Dayane do Carmo Mendonça

**Integrantes Internacionais:**

Remus Teodorescu

**Descrição:**

Este projeto investiga a utilização de conversores modulares multinível para a realização de sistemas de armazenamento de energia por baterias (SAEB). Esta abordagem permite obter um SAEB com elevada eficiência e confiabilidade, além de possibilitar a conexão direta do SAEB no sistema de distribuição de média tensão da concessionária. Como as baterias são distribuídas nos submódulos do conversor, isto facilita o balanceamento do estado de carga e resulta em uma maior confiabilidade, visto que as baterias que apresentarem falha podem ser eliminadas do circuito por meio de uma estrutura de bypass. Este projeto visa o desenvolvimento de uma metodologia de projeto, controle e a verificação implementação experimental da proposta. Espera-se com este projeto contribuir para o domínio da tecnologia de armazenamento de energia por baterias, que é estratégico para impulsionar o desenvolvimento do setor em Minas Gerais.

## **PROJETO 07**

**Título:** Proposta De Desenvolvimento De Módulos Semicondutores Híbridos Para Sistemas Fotovoltaicos E Acionamentos Elétricos

**Vigência:** 2021-2023

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

### **Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino (Coordenador)

Prof. Heverton Augusto Pereira

### **Descrição:**

Os requisitos de eficiência e densidade de potência são importantes fatores que impulsionam o desenvolvimento de novas tecnologias de semicondutores. Neste contexto, os dispositivos baseados em materiais semicondutores de banda larga têm ganhado mercado devido a suas propriedades físicas, que permitem que ganhos de desempenho. Contudo, um dos fatores limitantes é o custo, principalmente para correntes nominais mais altas. Isto motiva o desenvolvimento de chaves híbridas, que combinam interruptores de silício e materiais de banda larga, resultando em uma solução mais competitiva. O desenvolvimento de estudos para os módulos híbridos no cenário nacional é um caminho promissor para a evolução de inversores comerciais e sistemas fotovoltaicos. A proposta desse trabalho consiste em aprofundar o estudo em módulos híbridos buscando desenvolver um protótipo constituído de um Si-IGBT (do inglês, silicon insulatedgate bipolar transistor), conectado em paralelo com um SiC-MOSFET (do inglês, silicon carbide metal-oxidesemiconductor field-effect transistor) para aplicações em sistemas fotovoltaicos e acionamentos elétricos. O principal objetivo deste projeto é desenvolver e validar uma metodologia da modelagem para módulos híbridos, além de verificar a confiabilidade e a eficiência dos pares híbridos em configurações como a de um inversor monofásico de meia ponte. Esse estudo contém três principais etapas nas quais envolvem análises teóricas, computacionais e experimentais, envolvendo a montagem de um inversor monofásico de escala reduzida.

### **PROJETO 08**

**Título:** Sistema de armazenamento de energia baseado em baterias de segunda vida de arquitetura modular multinível

**Vigência:** 2021-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino (Coordenador)

Prof. Heverton Augusto Pereira

JDP Erick Matheus da Silveira Brito

Prof. Marcelo Martins Stopa

**Descrição:**

Este projeto investiga uma arquitetura alternativa para sistemas de armazenamento de energia por baterias (SAEB). A arquitetura proposta é inspirada nos conversores modulares (CM) e permite contornar as limitações da abordagem convencional que conecta as baterias em série. A proposta apresenta como adjetivos uma elevada eficiência, modularidade e escalabilidade. Cada bateria é conectada a um conversor eletrônico e as saídas destes conversores são conectadas em cascata. Esta abordagem permite carregar as baterias com correntes diferentes, viabilizando o uso de baterias de segunda vida ou de tecnologias diferentes. Como objetivos, será desenvolvida uma metodologia de projeto e controle do CM-SAEB. A validação será realizada por meio de uma montagem experimental e de simulações hardware in the loop (HIL). Espera-se que este projeto contribua para o domínio da tecnologia de armazenamento de energia que é estratégico para impulsionar o desenvolvimento do sistema elétrico nacional.

### **PROJETO 09**

**Título:** PD D722 Análise de Arranjo Técnico e Comercial baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV

**Vigência:** 2020-2023

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino

Prof. Heverton Augusto Pereira

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Wallace Boaventura (Coordenador)

**Descrição:**

O projeto é uma oportunidade de atendimento às necessidades do setor elétrico e possibilitará o estudo dos sistemas de armazenamento de energia, mais especificamente de tecnologia eletroquímica. Objetivos: Desenvolvimento, construção, instalação e avaliação técnica, regulatória e econômica de plantas piloto de armazenamento de energia conectada diretamente à rede de média tensão (13,8 kV), promovendo suporte para diversas funções desta rede, tais como: i) suprimento de energia em situação de contingência da fonte primária da concessionária para casos particulares; ii) suporte aos serviços ancilares, notadamente a regulação de tensão e o controle de potência reativa ao longo do alimentador; iii) Peak shaving, Load leveling ou operação de arbitragem. Esse projeto prevê a conexão de conjuntos de sistemas de armazenamento de energia totalizando 1,0 MW de potência, instalados em pontos estratégicos de dois ou mais alimentadores de média tensão (13,8 kV).

**PROJETO 10**

**Título:** Seguidor solar - Empresa Flex Solar

**Vigência:** 2019-2021

**Chamada/Agência/Financiador:** Flex Solar - Cooperação.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino

Prof. Heverton Augusto Pereira (Coordenador)

JDP. Erick Matheus da Silveira Brito

Discente Lucas Soares Gusman

Discente João Marcus Callegari

**Descrição:**

O presente projeto representa uma parceria entre as empresas GF2 Estruturas e Flex Solar de Divinópolis e a Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência (GESEP), esse último sendo um laboratório de pesquisa afiliado à Universidade Federal de Viçosa (UFV). A parceria visa a criação de um protótipo de seguidor automático para usinas fotovoltaicas, de modo a incrementar a geração de energia em até 30%.

### **PROJETO 11**

**Título:** Proposta de Sistema de Transmissão em Corrente Contínua de Alta Confiabilidade para Escoamento da Energia Gerada na Região Nordeste para o Centro-Sul Do Brasil

**Vigência:** 2018-2023

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino

Prof. Heverton Augusto Pereira (Coordenador)

Discente Renata de Sousa

Discente João Victor Matos

**Descrição:**

Devido aos incentivos constantes à geração distribuída, a necessidade de escoamento da energia elétrica para outros pontos e a melhoria na interligação entres os mesmos, deve aumentar. Nesse sentido, a forma mais tradicional de transmitir energia é através de sistemas trifásicos em corrente alternada (c.a.). Entretanto, essa forma apresenta algumas limitações em longas distâncias, devido aos elevados custos de cabos c.a.. Em muitos locais do mundo, a utilização do espaço terrestre torna-se cada vez mais restrita, haja vista que o número da população tende a crescer anualmente. Com esse cenário, a transmissão c.c. vem ganhando cada vez mais aceitação no cenário mundial, principalmente, devido a sua capacidade de instalação do sistema por vias subaquáticas (Offshore). Um sistema de transmissão em corrente contínua (c.c.) ou corrente contínua em alta tensão (HVDC, do inglês High-Voltage Direct Current), normalmente se comprime a dois parâmetros: os cabos c.c. para as linhas de transmissões e os conversores de energia. Por fim, o desenvolvimento de estudos e a projeção futura para essa tecnologia no cenário nacional deve ser apontada e fundamentada. Assim, é fundamental a formação de mão de obra à nível graduação e pós-graduação com conhecimento no tema, de maneira a influenciar a tomada de decisão, para que o país continue na vanguarda do desenvolvimento dos sistemas de transmissão de energia, garantindo qualidade e disponibilidade a todos os consumidores.

**PROJETO 12**

**Título:** Conversores Multifuncionais Aplicados à Integração de Fontes Renováveis às Redes Elétricas

**Vigência:** 2018-2022

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Allan Fagner Cupertino

Prof. Heverton Augusto Pereira

JDP Erick Matheus da Silveira Brito

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Victor Flores - UFMG (Coordenador)

**Descrição:**

Esse projeto propõe o estudo dos conversores multifuncionais em seus aspectos, como: estratégias de controle, degradação da vida útil quando executando serviços auxiliares e comportamento durante faltas na rede elétrica. O estudo será baseado em análises matemáticas, resultados simulados e experimentais utilizando bancadas representativas.

### **PROJETO 13**

**Título:** Desenvolvimento de Estimadores para Uso em Métodos Não-Intrusivos de Cálculo de Rendimento em Motores de Indução

**Vigência:** 2018-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Marcelo Martins Stopa (Coordenador)

**Descrição:**

Propõe-se neste trabalho o estudo de métodos de estimação de velocidade de rotação e de resistência de estator para implementação de algoritmos de estimação de rendimento em máquinas elétricas de indução.

### **PROJETO 14**

**Título:** Estudo de Estratégias de Alimentação de Motores de Indução de Nove Fases para Compensação de Falhas em Circuito Aberto

**Vigência:** 2018-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Marcelo Martins Stopa (Coordenador)

**Descrição:**

Propõe, neste trabalho, estudar estratégias de alimentação de máquinas de indução de nove fases sob condição de falta de fases, implementar as mais importantes e, a partir de simulações, analisá-las comparativamente. Busca-se, ainda, propor melhorias e/ou inovações que possam originar outras estratégias.

## **PROJETO 15**

**Título:** International Research Project (IRP) Maxwell

**Vigência:** 2024-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

### **Integrantes do PPGEL:**

Prof. Marcio Matias Afonso (Coordenador)

Profa. Úrsula do Carmo Resende

Prof. Sandro Trindade Mordente Gonçalves

Egresso André Luiz Paganotti

### **Instituições Nacionais Parceiras**

USP

UFMG

UFSC

CEFET-MG

### **Instituições Francesas Parceiras**

CNRS

Institut Polytechnique de Grenoble

École Centrale de Lyon

Université Claude Bernard Lyon I

Centrale Supélec

Université de Toulouse

### **Descrição:**

O IRP Maxwell é um convênio de cooperação científica entre instituições de pesquisa brasileiras e francesas. Do lado brasileiro, estão a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o Centro Tecnológico Federal de Minas Gerais (CEFET-MG). Do lado francês, estão o Centre national de la recherche scientifique(CNRS), o Institut Polytechnique de Grenoble, a École Centrale de Lyon, a Université Claude Bernard Lyon I, a Centrale Supélec, e a Université de Toulouse. As atividades de pesquisa preveem o desenvolvimento de métodos e ferramentas para modelagem,

análise, projeto e supervisão de sistemas de energia elétrica com uma dimensão multiescala. As principais áreas de atuação são: modelos de alta fidelidade, acoplamento entre modelos em diferentes escalas, métodos para projeto e otimização da operação desde o nível de componentes até o nível do sistema elétrico e o desenvolvimento de métodos que hibridizem características física e dados coletados. O IRP Maxwell é uma estrutura de fomento e coordenação que busca o desenvolvimento e o intercâmbio científico, o que poderá ser realizado através de teses em cotutela, bancas de teses mistas, intercâmbios de média e longa duração de jovens pesquisadores ou de pesquisadores sênior, coordenação de projetos (Capes-Cofecub, Editais CNPq e CNRS) e organização anual de reuniões franco-brasileiras. O coordenador geral do lado francês é Olivier Chadebec ( Directeur de Recherche do CNRS) e do lado brasileiro o Prof. Patrick Kuo-Peng da UFSC.

**PROJETO 16**

**Título:** Implementação computacional de modelo para avaliação de grandezas elétricas relativas ao desenvolvimento de descargas atmosféricas

**Vigência:** 2020-2021

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto (Coordenador)

Prof. Rafael Alípio

**Descrição:**

O objetivo deste projeto é a implementação computacional de um modelo já desenvolvido na literatura para avaliação de grandezas elétricas ao nível do solo durante o processo de incidência de uma descarga atmosférica nas proximidades.

**PROJETO 17**

**Título:** Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas segundo uma abordagem probabilística

**Vigência:** 2020-2021

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto (Coordenador)

Prof. Rafael Alípio

**Descrição:**

O objetivo principal deste projeto é desenvolver uma ferramenta computacional para comunicação externa com o programa de cálculo de transitórios ATP, com o intuito de realizar de forma automática um extenso conjunto de simulações e permitir a análise do desempenho da linha segundo uma abordagem probabilística. Espera-se que os resultados obtidos neste projeto possam subsidiar a definição de práticas de proteção consistentes para redução do número de desligamentos não programados do sistema de transmissão brasileiro.

## **PROJETO 18**

**Título:** Desenvolvimento de sensor para medição de campo elétrico de descargas atmosféricas (Field Mill)

**Vigência:** 2020-2021

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Listz Araújo (Coordenador)

**Descrição:**

A descarga atmosférica é um fenômeno natural, fonte de distúrbios e danos nos sistemas elétricos e eletrônicos. No Brasil, tais efeitos são intensificados pelo alto índice de incidência de descargas. Os processos envolvidos na formação e evolução das descargas implicam alguns efeitos, os quais podem ser percebidos à distância, o que permite desenvolver interpretações para os mecanismos que originaram o efeito, bem como estimar os impactos correspondentes. Notadamente, os deslocamentos de cargas do canal em formação promovem modificações no campo elétrico ao nível do solo que podem ser medidas por equipamentos apropriados. Em função do alto custo dos dispositivos disponibilizados no mercado, há poucas estações no Brasil aptas a realizarem a medição de perfis de campo elétrico ao nível do solo. Portanto, objetiva-se desenvolver uma tecnologia nacional para construir um equipamento de medição de campo elétrico de custo reduzido. O projeto é complexo e será realizado por partes. Nesse contexto, a proposta de trabalho em questão contempla a primeira parte do desenvolvimento, na qual pretende-se desenvolver um sensor de medição de campo elétrico. Em uma segunda etapa, possivelmente posterior a este projeto, será desenvolvido um sistema de aquisição de dados para o condicionamento do sinal medido, digitalizando-o e armazenando-o em um servidor local. Ressalta-se que, na primeira fase do projeto, será possível obter perfis de campo elétrico por meio de osciloscópios. Tais perfis obtidos durante tempestades poderão subsidiar outras pesquisas de relevância, sobretudo fornecendo dados reais para desenvolver modelagens mais representativas do fenômeno.

### **PROJETO 19**

**Título:** Desenvolvimento de modelagem computacional para avaliar a interação entre canais de descargas atmosféricas e linhas de transmissão de energia elétrica

**Vigência:** 2021-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto (Coordenador)

Prof. Rafael Alípio

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Listz Araújo

**Descrição:**

A descarga atmosférica é um fenômeno natural, fonte de distúrbios e danos nos sistemas elétricos e eletrônicos. No Brasil, tais efeitos são intensificados pelo alto índice de incidência de descargas. Os processos envolvidos na formação e evolução das descargas implicam alguns efeitos, os quais podem ser percebidos à distância, o que permite desenvolver interpretações para os mecanismos que originaram o efeito, bem como estimar os impactos correspondentes. Notadamente, os deslocamentos de cargas do canal em formação promovem modificações no campo elétrico ao nível do solo que podem ser medidas por equipamentos apropriados. Em função do alto custo dos dispositivos disponibilizados no mercado, há poucas estações no Brasil aptas a realizarem a medição de perfis de campo elétrico ao nível do solo. Portanto, objetiva-se desenvolver uma tecnologia nacional para construir um equipamento de medição de campo elétrico de custo reduzido. O projeto é complexo e será realizado por partes. Nesse contexto, a proposta de trabalho em questão contempla a primeira parte do desenvolvimento, na qual pretende-se desenvolver um sensor de medição de campo elétrico. Em uma segunda etapa, possivelmente posterior a este projeto, será desenvolvido um sistema de aquisição de dados para o condicionamento do sinal medido, digitalizando-o e armazenando-o em um servidor local. Ressalta-se que, na primeira fase do projeto, será possível obter perfis de campo elétrico por meio de osciloscópios. Tais perfis obtidos durante tempestades poderão subsidiar outras pesquisas de relevância, sobretudo fornecendo dados reais para desenvolver modelagens mais representativas do fenômeno.

## **PROJETO 20**

**Título:** Desenvolvimento de uma rede de dispositivos para medição e registro de corrente de raios

**Vigência:** 2021-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto

Prof. Rafael Alípio

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Listz Araújo (Coordenador)

**Descrição:**

O registro da forma da onda de corrente de raios constitui elemento fundamental para definição e dimensionamento das práticas de proteção do sistema elétrico de potência e de equipamentos eletrônicos. Atualmente, poucas estações de pesquisas no mundo estão aptas a realizarem a medição de corrente de raios, uma vez que torres instrumentadas requerem investimentos altos para a sua construção e operação. Desta forma, a aquisição de dados de várias localidades em uma determinada região se torna inviável. Entretanto, esta proposta de trabalho apresenta uma solução alternativa, com custo reduzido em relação ao sistema tradicional, a qual consiste em desenvolver uma rede dispositivos para a medição e registro de primeiras correntes de raios. Pretende-se, inicialmente, reproduzir o medidor de baixo custo projetado na tese de doutorado intitulada "Desenvolvimento de Dispositivo Original para Medição e Registro de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas?". Na sequência, serão realizados aprimoramentos, especialmente no sistema de comunicação, de modo a estabelecer um canal de comunicação eficiente entre os módulos da rede. Posteriormente, pretende-se construir e instalar pelo menos 5 medidores na região metropolitana de Belo Horizonte, sendo que um deles será instalado no prédio 19 do CEFET-MG no Campus Nova Gameleira. A aplicação em larga escala da rede de medidores no Estado de Minas Gerais poderá constituir um banco de dados extenso, o qual poderá mapear características específicas dos raios de cada região e, conseqüentemente, fornecer elementos para subsidiar outras pesquisas, notadamente aquelas relacionadas aos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

## **PROJETO 21**

**Título:** Desenvolvimento de protocolo de comunicação entre dispositivos portáteis de medição de correntes de raios

**Vigência:** 2022-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto

Prof. Rafael Alípio

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Listz Araújo (Coordenador)

**Descrição:**

O registro da forma de onda da corrente de retorno de descargas atmosféricas (raios) constitui elemento fundamental para definição e dimensionamento das práticas de proteção de sistemas elétricos de potência e de equipamentos eletrônicos. Atualmente, poucas estações de pesquisas no mundo estão aptas a realizarem a medição completa de corrente de raios, uma vez que torres instrumentadas requerem investimentos altos para a sua construção e operação. Dessa forma, a aquisição de dados em várias localidades dentro de uma determinada região é uma tarefa inviável. Nesse contexto, esta proposta de Projeto de Iniciação Científica apresenta uma solução alternativa, com custo reduzido em relação ao sistema tradicional, a qual consiste na geração de contribuições relevantes para o desenvolvimento de um dispositivo portátil para a medição e registro de primeiras correntes de raios. Pretende-se, inicialmente, reproduzir um medidor de baixo custo projetado durante a elaboração da tese de doutorado do docente proponente. Na sequência, serão realizados aprimoramentos, especialmente no sistema de comunicação do dispositivo. A depender dos resultados obtidos ao longo do projeto, poderá ser viabilizada a instalação do dispositivo para medir correntes de raios em estruturas comuns, tais como o Prédio 19 do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG. A aplicação em larga escala de uma rede de medidores desse tipo possibilita a constituição de um banco de dados extenso, o qual poderá mapear características específicas dos raios de cada região e, conseqüentemente, fornecer elementos para subsidiar outras pesquisas, notadamente aquelas relacionadas aos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

## **PROJETO 22**

**Título:** Medição de Campos Elétricos de Raios no Campus Nova Gameleira

**Vigência:** 2022-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto (Coordenador)

Prof. Rafael Alípio

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Listz Araújo

**Descrição:**

Os raios (ou descargas atmosféricas) constituem um fenômeno natural que é fonte de distúrbios eletromagnéticos intensos e danos em sistemas elétricos e eletrônicos. No Brasil, esses efeitos são intensificados pelas elevadas taxas de incidência de descargas no solo. Os processos envolvidos na formação e evolução dos raios implicam alguns efeitos, os quais podem ser percebidos à distância, o que permite desenvolver interpretações para os mecanismos que originaram o efeito, bem como estimar os impactos correspondentes. Notadamente, os deslocamentos de cargas do canal em formação promovem modificações no campo elétrico ao nível do solo que podem ser medidas por equipamentos apropriados. Diante desse contexto, este Projeto de Iniciação Científica tem como objetivo geral o desenvolvimento e instalação de um sistema de medição completo de campos elétricos de descargas atmosféricas incidindo nas edificações do Campus Nova Gameleira e nas suas adjacências. Para tanto, serão empregados sensores do tipo "antena prato", circuitos condicionadores de sinais e sistemas de aquisição de dados, todos já disponíveis no LABTEM / CEFET-MG. Os dados a serem obtidos após a instalação do sistema de medição possuem um potencial inestimável de contribuição para o entendimento do fenômeno de incidência de raios em estruturas aterradas. Ademais, a análise de dados de descargas atmosféricas reais é capaz de subsidiar o desenvolvimento de modelagens mais representativas do fenômeno.

### **PROJETO 23**

**Título:** Estudo das correntes de longa duração em descargas atmosféricas

**Vigência:** 2023-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto

Prof. Rafael Alípio

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Listz Araújo

Marcelo Saba (Coordenador)

**Descrição:**

As descargas atmosféricas que atingem o solo (raios nuvem-solo) são responsáveis por imensos prejuízos materiais e por mais de uma centena de óbitos anualmente no país. Os raios que contêm correntes de longa duração, conhecidas como correntes contínuas, produzem danos associados ao aquecimento provocado por elas (queimadas, fusão de materiais, incêndios, danos em linhas de transmissão etc.). Este projeto tem como objetivo a observação e caracterização das correntes contínuas, dos raios que as contêm e das nuvens de tempestades associadas a estes raios. Para alcançar este objetivo, além da análise do banco de dados de vídeos obtidos por câmeras de alta velocidade e de dados de campo elétrico, pretendemos realizar novas medidas que serão complementadas por sensores auxiliares (câmera de vídeo termográfica, interferômetro, Lightning Mapping Array, sensores de campo elétrico e campo eletrostático atmosférico, sensores de corrente elétrica, fotômetros, sistemas de localização de raios e dados de radares e satélites meteorológicos). A análise conjunta de dados passados e novos obtidos em diferentes países, servirá para caracterizar parâmetros importantes das correntes contínuas (frequência de ocorrência, duração e intensidade), dos raios que produzem correntes contínuas (polaridade, multiplicidade etc.) e das nuvens de tempestade associadas a estes fenômenos (altura do topo, extensão horizontal, estágio de desenvolvimento etc.). Este estudo permitirá que estes parâmetros sejam melhores definidos e, com isso, auxiliar na validação e melhoria do conhecimento utilizado em áreas como a ocorrência

de queimadas e incêndios causados por raios, aperfeiçoamento de projetos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), melhor estimativa de produção de gases que influenciam na química da atmosfera, melhor compreensão da produção de eventos luminosos transientes (TLEs), como ocorre a iniciação de raios ascendentes etc.

**PROJETO 24**

**Título:** Modelagem e simulação de transitórios de origem atmosférica em sistemas elétricos considerando simultaneamente elementos e fenômenos dependentes do tempo e da frequência

**Vigência:** 2019-2022

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto (Coordenador)

**Descrição:**

Este projeto pretende gerar uma contribuição na modelagem e simulação mais rigorosa de transitórios em sistemas elétricos, em particular no desenvolvimento de modelos computacionais híbridos (tempo/frequência) para simulação de transitórios.

**PROJETO 25**

**Título:** Avaliação experimental e modelagem computacional de DPS classe III frente a surtos atmosféricos

**Vigência:** 2020-2021

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto

Prof. Rafael Silva Alípio (Coordenador)

**Descrição:**

O objetivo principal deste projeto é realizar ensaios de impulso em DPSs comerciais com a aplicação de impulsos de tensão não padronizados de amplitude de até 1,5 kV e diferentes formas de onda para a caracterização do comportamento dos supressores de surto frente a transitórios de origem atmosférica. Foco é dado aos DPSs classe III, normalmente utilizados no interior de edificações, imediatamente à montante do equipamento/aparelho a ser protegido.

## **PROJETO 26**

**Título:** Simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de cabos subterrâneos utilizando as teorias de campo e de linhas de transmissão

**Vigência:** 2021-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

### **Integrantes do PPGEL:**

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto

Prof. Rafael Silva Alípio (Coordenador)

### **Descrição:**

Normalmente, a análise de transitórios em sistemas de cabos subterrâneos é realizada usando ferramentas de simulação do tipo EMTP, como ATP, EMTP-RV e PSCAD/EMTDC, que possuem modelos de cabos baseados na teoria de linhas de transmissão. Tais modelos, no entanto, usam expressões de correção do efeito do solo suficientemente precisas apenas em baixas frequências ou para solos de baixa resistividade, além de considerarem intrinsecamente cabos infinitamente longos e modo de propagação TEM. Tais aproximações levam a inexatidões no cálculo de transitórios de alta frequência em cabos subterrâneos que podem ter efeitos prejudiciais em estudos de coordenação de isolamento. Tais inexatidões são especialmente significativas no caso de solos de alta resistividade, como no estado de Minas Gerais. O presente projeto pretende gerar uma modelagem eletromagnética para cabos subterrâneos que inclua os aspectos relevantes e de maior influência na simulação de transitórios, sem a consideração de hipóteses simplificadoras, tais como modo de propagação TEM e cabo infinitamente longo.

**PROJETO 27**

**Título:** Avaliação do impacto de descargas de retorno subsequentes no cálculo do desempenho de linhas de transmissão

**Vigência:** 2021-2022

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Rafael Silva Alípio (Coordenador)

**Descrição:**

O presente projeto pretende investigar o impacto de se considerar as descargas subsequentes, além das primeiras descargas de retorno, no cálculo do desempenho de linhas de transmissão.

**PROJETO 28**

**Título:** Implementação de um programa computacional para análise de transitórios em sistemas de cabos subterrâneos multifásicos e definição de diretrizes para a escolha de modelos de cabos

**Vigência:** 2021-2022

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informada.

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Rafael Silva Alípio (Coordenador)

**Descrição:**

O objetivo principal deste projeto é definir diretrizes para a avaliação precisa de transitórios eletromagnéticos em sistemas de cabos multicondutores subterrâneos.

**PROJETO 29**

**Título:** Modelagem, simulação e medição da resposta transitória de sistemas de cabos subterrâneos

**Vigência:** 2022-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Rafael Silva Alípio (Coordenador)

**Descrição:**

Este projeto tem o objetivo de gerar uma contribuição na análise da resposta transitória de cabos subterrâneos nas perspectivas de desenvolvimento, validação e definição de limites de aplicabilidade de modelos e obtenção de resultados experimentais. Projeto relativo à Chamada CNPq N° 04/2021 - Bolsas de Produtividade em Pesquisa.

### **PROJETO 30**

**Título:** Modelagem teórico-experimental de cabos subterrâneos para simulação de transitórios eletromagnéticos

**Vigência:** 2022-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq/MCTI/FNDCT N 18/2021 - Faixa B - Grupos Consolidados

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Rafael Silva Alípio

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Prof. Alberto de Conti (Coordenador)

**Descrição:**

Projeto referente à Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N 18/2021 - Faixa B - Grupos Consolidados. Cabos subterrâneos de comprimento reduzido, com extensão de dezenas a centenas de metros, têm sido frequentemente utilizados na integração de sistemas de geração de energia renováveis com redes de transmissão e distribuição. Além disso, encontram emprego na conexão de subestações isoladas a gás localizadas em centros urbanos, e na interligação de sistemas de aterramento de turbinas eólicas. No contexto brasileiro, é comum que a resistividade do solo no local de instalação dos cabos seja elevada, o que pode resultar em sobretensões de elevada magnitude no caso de surtos atmosféricos e de manobra. Além disso, a curta extensão dos cabos resulta em fenômenos transitórios com frequências elevadas que podem levar à ocorrência de falhas em transformadores e demais equipamentos. O estudo de transitórios eletromagnéticos em cabos subterrâneos é usualmente realizado em plataformas computacionais como o ATP (Alternative Transients Program) que, por ser de uso gratuito, é empregado em todo o mundo. Contudo, os modelos de cabos subterrâneos disponíveis no ATP só podem ser empregados na simulação de transitórios de baixa frequência em solos de baixa resistividade. Este projeto dedica-se ao desenvolvimento de uma modelagem matemática rigorosa para a simulação de transitórios eletromagnéticos em cabos subterrâneos. Para isso, aplica-se a técnica numérica de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), que soluciona diretamente as equações de Maxwell, para representar geometrias típicas de cabos em três dimensões. Essa técnica é utilizada como referência para validação de outras abordagens que serão propostas com base na teoria

de linha de transmissão. O projeto também engloba a realização de medições da resposta transitória de cabos subterrâneos frente à aplicação de sinais impulsivos. Os resultados de simulação com FDTD e medição são a base para validação de novos modelos de cabos que serão posteriormente implementados em programas como o ATP para uso pela comunidade.

**PROJETO 31**

**Título:** Analysis of lightning transients in wind farms due to direct strikes: electromagnetic modelling and experimental evaluation

**Vigência:** 2022-2024

**Chamada/Agência/Financiador:** Swiss National Science Foundation

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Rafael Silva Alípio (Coordenador)

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Dr. FARHAD RACHIDI

**Descrição:**

The specific aims of this project briefly consist of (i) improving the modeling of wind farms to simulate electromagnetic transients resulting from direct lightning strikes, (ii) performing measurements of transient voltages developed in real wind farms by applying impulse current pulses to validate the developed models, and (iii) proposing consistent mathematical representation for the return stroke currents associated with upward flashes for the simulation of transients, based on measurements of real lightning currents carried out in instrumented towers, for example, those recorded at the Säntis Tower in Switzerland..

**PROJETO 32**

**Título:** Contribuição para a área de transitórios eletromagnéticos em sistema de potência com foco no objetivo de desenvolvimento sustentável

**Vigência:** 2023-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** Chamada MCTIC/CNPq N 10/2023 - Faixa B - Grupos Consolidados

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Rafael Silva Alípio

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Profa MARIA CRISTINA DIAS TAVARES – UNICAMP (Coordenador)

**Descrição:**

O sistema elétrico brasileiro enfrenta um período de expansão significativa, impulsionado pela necessidade de integrar fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, à matriz energética. Esse projeto visa capacitar novos pesquisadores para atuarem em estudos de transitórios eletromagnéticos, essenciais para o desenvolvimento de novas linhas de transmissão e integração ao Sistema Interligado Nacional. Entre as iniciativas, destaca-se a pesquisa sobre eletrificação de comunidades isoladas através de sistemas coletores que extraem a energia ao redor de linhas de transmissão de alta tensão, beneficiando áreas distantes sem comprometer a segurança do sistema. Adicionalmente, o projeto foca no desenvolvimento de tecnologias inovadoras para linhas de transmissão, incluindo soluções de baixo custo e alta capacidade com menor impacto ambiental, bem como na transmissão de energia em longas distâncias sem a necessidade de subestações intermediárias. Essas inovações prometem não apenas eficiência energética, mas também um significativo avanço na sustentabilidade e na redução de custos da energia gerada.

**PROJETO 33**

**Título:** Development of a computer code for the evaluation of fast electromagnetic transients on overhead lines taking into account the frequency-dependence of soil parameters and nonlinear terminations

**Vigência:** 2023-2023

**Chamada/Agência/Financiador:** Swiss National Science Foundation

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Rafael Silva Alípio (Coordenador)

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Dr. FARHAD RACHIDI

**Descrição:**

This project focused on investigating critical aspects of transmission line performance, particularly the challenges posed by frequency-dependent losses and transient behavior in the time domain. The research aimed to develop precise formulations for line parameters and create a computational tool capable of simulating various scenarios. These efforts were essential for enhancing the security and reliability of power and signal transmission infrastructures, especially within defense systems. The project was conducted in collaboration with the Electromagnetic Compatibility Laboratory (EPFL) and testing facilities from Armasuisse W+T, leveraging their expertise to address complex issues related to electromagnetic coupling and transport phenomena in transmission lines.

### **PROJETO 34**

**Título:** Desenvolvimento de uma janela-rectenna a base de grafeno para colheita de energia eletromagnética

**Vigência:** 2024-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Profa. Úrsula do Carmo Resende (Coordenador)

Prof. Sandro Trindade Mordente Goncalves

Discente Icaro V Soares

**Descrição:**

Neste projeto, será realizado o desenvolvimento teórico e experimental, por meio da construção de um protótipo, de uma janela-rectenna elaborada a partir de filmes de grafeno para alimentação de redes de sensores sem fio (Wireless Sensor Network - WSN) a serem empregados em sistemas de Internet das Coisas (Internet of Things - IoT). A rectenna é um sistema composto por uma antena, que coleta a energia eletromagnética disponível no ambiente, e um circuito retificador que realiza a transformação do sinal de Radiofrequência (RF) em corrente contínua. A rectenna proposta deve, então, aproveitar a energia eletromagnética disponível no ambiente, provida por sistemas celulares, roteadores ou fontes especificamente e exclusivamente projetadas e posicionadas para alimentação das WSNs. A estrutura proposta deve possuir as características físicas de uma janela, sendo assim natural e facilmente incorporada ao ambiente. Dentre tais características destacam-se o formato planar e rígido e a parcial transparência ou translucidez. Essas características podem ser alcançadas por meio do emprego de materiais transparentes de baixo custo, como vidro ou acrílico, como substrato dielétrico e de um filme à base de grafeno depositado por impressão como superfície condutora para a construção da antena. Cada janela será composta por um conjunto de vários pares antena-retificador conectados em paralelo, de forma a aumentar a quantidade de energia coletada do ambiente, formando uma rede de rectennas, com parâmetros geométricos modelados e construídos para otimização do rendimento do protótipo, tanto pela seleção de materiais avançados (grafenos), quanto pelos ajustes das dimensões das rectennas. Adicionalmente à função de coletar energia disponível no ambiente, a incorporação do filme à base de grafeno à janela-rectenna proporciona também incremento nos níveis de conforto térmico e visual, devido à redução da quantidade de raios solares que penetram no ambiente.

**PROJETO 35**

**Título:** IMDTEC INFRAESTRUTURA MULTIUSUÁRIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO CEFET-MG

**Vigência:** 2023-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CEFET-MG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Profa. Úrsula do Carmo Resende (Coordenador)

Prof. Sandro Trindade Mordente Goncalves

Prof. Válder Júnior de Souza Leite

Prof. Rafael Silva Alípio

Prof. Marcio Matias Afonso

Prof. Marcelo Martins Stopa

Prof. Miguel de Brito Guimarães Neto

**Descrição:**

PROJETO FINEP: IMDTEC INFRAESTRUTURA MULTIUSUÁRIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO CEFET-MG  
COORDENAÇÃO DE SUBPROJETO: Infraestrutura para Soluções Numéricas Científicas e Tecnológicas (SIMULA\_TEC ).

### **PROJETO 36**

**Título:** Desenvolvimento de uma rectena a base de grafeno incorporável em janelas para alimentação de sensores IoT

**Vigência:** 2023-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Profa. Úrsula do Carmo Resende (Coordenador)

Prof. Sandro Trindade Mordente Goncalves

**Descrição:**

Neste projeto, será realizado o desenvolvimento teórico, computacional e experimental de uma rectena no formato de uma janela. A rectena é um sistema composto por uma antena, que coleta energia eletromagnética disponível no ambiente e um circuito retificador, que realiza a transformação do sinal de Rádio Frequência (RF) em corrente contínua. A rectena proposta deve operar na faixa de frequência de WiFi (2.45GHz e 5.8GHz) e utilizar a energia recuperada para a alimentação de redes de sensores sem fio (WSN) empregadas em sistemas de internet das coisas IoT). Deste trabalho multidisciplinar envolvendo conhecimentos nas áreas de Engenharia Elétrica e de Materiais, resultará um protótipo construído a partir de filmes de grafeno. Esse protótipo deve possuir as características físicas de uma janela, e assim ser natural e facilmente incorporado à diferentes tipos de estruturas. Dentre tais características destacam-se o formato planar e rígido e transparência ou translucidez. Essas características podem ser alcançadas por meio do emprego materiais transparentes de baixo custo, e.g. vidro/acrílico, como substrato dielétrico e de um filme a base de grafeno, depositado por impressão, como superfície condutora. Cada janela será composta por de n pares antena-retificador conectados em paralelo, de forma a aumentar a quantidade de energia coletada, formando uma rede de rectenas, com parâmetros geométricos modelados e construídos para otimização do rendimento do protótipo, tanto pela seleção de materiais avançados, quanto pelos ajustes das dimensões das rectenas. Adicionalmente à função de coletar energia, a incorporação do filme a base de grafeno tem o potencial de incrementar os níveis de conforto térmico e visual devido a redução da quantidade de raios solares que penetram no ambiente. Tais características podem interessar a uma vasta gama de consumidores que utilizam de redes IoT em aplicações residências, ambientes industriais e veículos automotores, incluindo trens.

**PROJETO 37**

**Título:** Estudo, Otimização e Projeto de Antenas, Bobinas e Circuitos de Radiofrequência para Transmissão e Colheita de Energia Sem Fio

**Vigência:** 2021-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Profa. Úrsula do Carmo Resende (Coordenador)

Prof. Sandro Trindade Mordente Goncalves

Prof. Glaucio Lopes Ramos

**Descrição:**

Projeto que tem como objetivo estudar, simular e realizar medições experimentais de dispositivos eletromagnéticos e eletrônicos a fim de desenvolver sistemas para transmissão de energia sem fio que envolve: colheita da energia do ar de fontes disponíveis como roteadores WIFI, energia luminosa artificial indoor, entre outros, para dispositivos de baixíssima potência tais como sensores em campo; transmissão de potência sem fio para recarregar baterias ou alimentar dispositivos à distância.

**PROJETO 38**

**Título:** Electromagnetic Energy Harvesting via Glass Windows

**Vigência:** 2021-2023

**Chamada/Agência/Financiador:** Não Informado

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Profa. Úrsula do Carmo Resende (Coordenador)

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Dr. Wai-Tung Ng (Universidade de Toronto)

**Descrição:**

"Electromagnetic Energy Harvesting via Glass Windows" convênio formalizado com a universidade de Toronto para desenvolvimento de projeto em parceria.

### **PROJETO 39**

**Título:** Sistema para Reaproveitamento de Energia Eletromagnética utilizando Rectennas

**Vigência:** 2018-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Profa. Úrsula do Carmo Resende (Coordenador)

**Descrição:**

Nesse trabalho será realizada a concepção de um Sistema para Reaproveitamento de Energia Eletromagnética (SREE) utilizando Rectennas (mais de um elemento Rectenna ligados) operando na região de campo distante na frequência de 2.45GHz. Para esse protótipo pretende-se alimentar como carga uma lâmpada de Led de potência máxima de 0.5 W. Será realizada uma investigação completa acerca dos tipos de Rectennas propostas na literatura, de modo a identificar antenas que apresentem determinadas características e configurações que possibilitem uma Conversão eficiente da energia eletromagnética na frequência de 2.45 GHz em energia elétrica DC. Com base no estudo dos trabalhos existentes, deve ser proposta uma geometria de Rectenna de altaeficiência e cuja configuração se mostre de fácil construção. Escolhido o modelo da antena, esta será projetada e avaliada por meio dos softwares de simulação CST (Computer Simulation Technology) e ADS (Advanced Design System). A modelagem do circuito retificador será realizada no software ADS utilizando teoria de linhas de transmissão e modelos matemáticos de diodos Schottky. A avaliação do sistema completo (antena e circuito retificador) também será realizada no software ADS. Considerando os resultados das simulações serão construídos protótipos das antenas, dos circuitos retificadores, das Rectennas e do SREE. Finalmente, serão então realizados diferentes ensaios de forma a verificar a funcionalidade, eficiência e aplicabilidade do sistema desenvolvido.

### **PROJETO 40**

**Título:** Análise de Estabilidade e Controle de Sistemas Dinâmicos por meio de Programação Semidefinida

**Vigência:** 2024-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Valter Júnior de Souza Leite

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Dra. Sophie Tarbouriech - França

Dr. Giórgio Valmórbida - França

Dr. Pedro Peres – UNICAMP (Coordenador)

**Descrição:**

O objetivo deste projeto é o estudo de problemas de controle para sistemas dinâmicos usando como ferramental básico a Programação Semidefinida. São empregados modelos matemáticos que descrevem o comportamento de diversos problemas de interesse da área de Engenharia. Usando esses modelos e tendo como ponto de partida a análise de estabilidade por meio de funções de Lyapunov, podem ser obtidas condições na forma de desigualdades matriciais lineares (em inglês, Linear Matrix Inequalities LMIs), que podem ser testadas computacionalmente de maneira eficiente. Para isso são utilizadas transformações lineares, mudanças de variáveis, e relaxações que podem incluir variáveis extras aos procedimentos de otimização, atingindo um conjunto de soluções mais amplo. Essa abordagem permite tratar os problemas centrais desta proposta que são i) estratégias de controle e filtragem orientadas por dados aplicadas a sistemas do tipo Lure; ii) novas condições de análise de estabilidade e projeto de controladores para sistemas polinomiais com representação implícita; iii) métodos para síntese de controladores no contexto de processos com dados amostrados. Esses problemas são consequências das exigências de melhoria de desempenho de processos e do desenvolvimento tecnológico na implementação das técnicas avançadas de controle, como, por exemplo, o controle via rede. Além disso, representam lacunas importantes tanto na teoria quanto em aplicações em processos de relevância sócio-econômico-ambiental. Ferramentas baseadas em LMIs têm se mostrado eficientes para tratar problemas de controle robusto e dependente de parâmetros, servindo de base para os novos desafios no âmbito desta proposta.

**PROJETO 41**

**Título:** Networked control of hybrid systems by semidefinite programming with applications in industry 4.0

**Vigência:** 2023-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CAPES

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Valter Júnior de Souza Leite

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Dr. Giórgio Valmórbida - França

Dr. Pedro Peres – UNICAMP (Coordenador)

**Descrição:**

The general objective of the present project is the development of mathematical and computational tools for analysis and control design of hybrid dynamical systems operating over communication networks. The project aims also at interchanging experiences and techniques among the participants, involving students (PhD. and M. Sc.) and post-docs in research and developments as well as generating joint publications in international journals and conferences.

## **PROJETO 42**

**Título:** Análise de Estabilidade e Controle de Sistemas Dinâmicos por meio de Programação Semi-definida

**Vigência:** 2023-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CAPES

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Valter Júnior de Souza Leite

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Dr. Pedro Peres – UNICAMP (Coordenador)

**Descrição:**

Este projeto de pesquisa pretende avançar no estudo de estabilidade e síntese de controladores para sistemas dinâmicos lineares com incertezas paramétricas, tanto variantes como invariantes no tempo, além de certas classes de não-linearidades. A abordagem metodológica empregada baseia-se no uso de funções de Lyapunov, tanto independentes como dependentes de parâmetros, para estabelecer condições de análise e síntese que sejam mais gerais ou menos conservadoras. A estratégia principal será a aplicação de técnicas de programação semi-definida para tratar problemas formulados como otimização convexa com restrições em forma de desigualdades matriciais lineares. Especificamente, o projeto visa abordar os problemas de estabilidade e projeto de controladores robustos para sistemas do tipo Lure, considerando parâmetros variantes no tempo. Serão estudadas diversas classes de sistemas, incluindo sistemas chaveados (lineares e afins), impulsivos, nebulosos do tipo Takagi-Sugeno e positivos. Além disso, será considerada a questão do controle desses sistemas via rede e serão investigadas estratégias para minimizar a transmissão de dados nessas malhas de controle. Serão selecionadas alguns dos métodos desenvolvidos para a realização de experimentos em sistemas reais, visando ilustrar a aplicabilidade dos resultados em ambiente industrial.

### **PROJETO 43**

**Título:** Estabilidade e estabilização de Sistemas incertos ou variantes no tempo sob Restrições

**Vigência:** 2022-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CAPES

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Valter Júnior de Souza Leite (Coordenador)

Egresso Lucas Arantes

**Descrição:**

Esta é uma proposta de pesquisa que, do ponto de vista técnico, foca em dois aspectos fundamentais no campo da Teoria de Controle. O primeiro deles, consiste na investigação de condições matemáticas que permitam a análise de estabilidade e a síntese de controladores que assegurem a estabilidade e desempenho para uma classe ampla de sistemas, contemplando características fundamentais de aplicações de controle em processos. O segundo aspecto foca na questão tecnológica, vinculada à implementação dos controladores desenvolvidos em equipamentos típicos do ambiente industrial. Esses aspectos são complementares e visam prosseguir o esforço de pesquisa que vem sendo realizado pelo proponente de tratar problemas fundamentais de controle, considerando sempre a aplicação das técnicas em processos reais. Alia-se a esses dois aspectos técnicos a consequente necessidade de formação de recursos humanos capazes de lidar com os desafios mencionados, tratando-os com rigor matemático e, simultaneamente, com habilidades para promover a implementação das novas estratégias de controle nos dispositivos já existentes no meio industrial.

## **PROJETO 44**

**Título:** Análise, projeto e controle de sistemas sob restrições

**Vigência:** 2022-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** FAPEMIG

**Captação:** Não Informada.

### **Integrantes do PPGEL:**

Prof. Valter Júnior de Souza Leite (Coordenador)

Egresso Lucas Arantes

### **Descrição:**

Pretende-se investigar questões fundamentais relativas à análise de estabilidade e à estabilização de sistemas sujeitos a restrições de particular interesse da atividade industrial, tais como: saturação de atuadores (em amplitude ou taxa de variação), restrições de comunicação via rede, parâmetros variantes no tempo, imperfeições de medidas usadas para controle, falhas de atuadores ou medidores. Apesar de amplo, esse conjunto de fenômenos pode ser tratado por ferramentas em comum, advindas da Teoria de Controle e que utilizam a abordagem por funções (funcionais) de Lyapunov(-Krasovskii). Tais restrições impõem desafios ao encontrar demandas presentes, por exemplo, no controle via rede. Uma tendência mundial é o desenvolvimento malhas de controle que ocupem o mínimo possível a rede de dados, levando a amostragens em períodos irregulares, como pode ocorrer no contexto de internet das coisas. Outro desafio envolve a representação de sistemas físicos na forma de modelos que capturem as dinâmicas relevantes. Modelos com parâmetros variantes no tempo são candidatos naturais representar processos sujeitos a restrições e controle via rede. Abordagens baseadas em representações LPV (do inglês linear parameter varying) ou quasi-LPV destacam-se na modelagem e desenvolvimento de controladores para processos que requerem alto desempenho, relevantes à economia mineira, tais como os encontrados nas indústrias automotiva, aeronáutica e química. Este proponente tem focado nesses aspectos práticos que requerem nova fundamentação teórica. Espera-se que este projeto auxilie na pesquisa de melhores condições de análise de estabilidade e de projeto de controladores e que considerem aspectos práticos fundamentais que trazem restrições ao funcionamento de processos. Desdobramentos esperados incluem a aplicação das técnicas desenvolvidas em plantas de laboratório e a formação de recursos humanos especializados (doutorado, mestrado e graduação).

**PROJETO 45**

**Título:** Control of polytopic convex systems under asynchronous modes

**Vigência:** 2021-Atual

**Chamada/Agência/Financiador:** CAPES

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Valter Júnior de Souza Leite (Coordenador)

Egresso Lucas Arantes

**Integrantes Externos ao PPGEL:**

Dr. Kevin Guelton – URCA/Reims/França

**Descrição:**

Este projeto alinha-se com as preocupações atuais da comunidade internacional de controle e automação, particularmente no que diz respeito à síntese de leis de controle não-quadráticas para sistemas complexos, envolvendo modos de operação assíncronos entre a parte de controle e o sistema em estudo. O desafio central consiste em retirar barreiras teóricas relativas à síntese de controladores assíncronos permitindo a estabilização de sistemas de chaveamento e/ou não-lineares descritos por modelos politópicos convexos (lineares com chaveamento, quasi-LPV, Takagi-Sugeno, etc.). O interesse da abordagem é permitir a extensão de algumas teorias de controle linear ao caso de sistemas de chaveado e/ou não-lineares. As abordagens propostas no âmbito dos sistemas de chaveado são diferentes daquelas propostas para sistemas quase-LPV/Takagi-Sugeno. Objetiva-se que a natureza das funções de ativação sejam consideradas de acordo com a classe de sistemas estudados. Consequentemente, suportes específicos de condições teóricas são esperados para cada classe de sistemas. Por outro lado, dada a representação na forma politópica, espera-se formular resultados mais gerais, abrangendo mais de uma classe de sistemas. Aspectos fundamentais para a indústria, tais como saturação de elementos de controle, restrições operacionais, controle via rede e economia de dados transmitidos serão tratados para as classes de sistemas estudados. Portanto, o projeto possui interfaces com sistemas amostrados, geração de eventos para transmissão de dados, etc. Finalmente, a validação experimental dos resultados teóricos obtidos será realizada em um referencial de aplicação que consiste em UAVs quadrirotor (disponível no CReSTIC) ou em um sistema

industrial para o controle de nível em tanques com perfis não lineares (disponível no CEFET-MG). O projeto inclui a cotutela de um discente de doutorado no PPGMMC, supervisionado por Valter Leite e Kevin Guelton (URCA/Reims/França)..

**PROJETO 46**

**Título:** Estabilidade e estabilização de Sistemas incertos ou variantes no tempo sob Restrições

**Vigência:** 2020-2022

**Chamada/Agência/Financiador:** CNPq

**Captação:** Não Informada.

**Integrantes do PPGEL:**

Prof. Valter Júnior de Souza Leite (Coordenador)

**Descrição:**

O objetivo geral desta proposta é de investigar novas condições, formuladas em termos de desigualdade matriciais lineares ou por meio de relaxações numéricas envolvendo etapas de otimização convexa, que permitam obter resultados menos conservadores tanto para a análise de estabilidade quanto para a síntese de controladores para sistemas com atrasos nos estados e sujeitos a restrições. Motivado por problemas em processos reais, são tratados tanto sistemas incertos quanto sistemas quasi-LPV.