UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física

PROJETO DE PESQUISA

Caracterização, modelo e controle de sistemas de conversão e arranjos de acumuladores de energia elétrica aplicados a recursos energéticos distribuídos

COORDENADOR:

Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva

Fevereiro de 2022

Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA
Rua Cento e Sessenta e Três, 300 – Garapu
54518-430 Cabo de Santo Agostinho/PE
www.ppengfis.ufrpe.br

I- IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

1- Título	
Caracterização, modelo e controle de sistemas de conversão e arranjos de acumuladores de energia elétrica aplicados a recursos energéticos distribuídos	
2- Vigência	
Início previsto (mês/ano):	03/2021
Término previsto (mês/ano):	02/2025
3- Classificação da área do projeto (classificação definida pelo CNPq)	
Nome da área :	Engenharias
Número do código:	3.00.00.00-9
Nome da sub-área :	Engenharia Elétrica
Número do código:	3.04.00.00-7
Nome da especialidade:	Sistemas Elétricos de Potência
Número do código:	3.04.04.00-2
4- Linhas de pesquisa do PPENGFIS contempladas no projeto	
☐	Materiais Nanoestruturados
☐	Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais
☐	Metrologia e Instrumentação
☐	Espectroscopia coerente e óptica não linear
☒	Controle e dinâmica não linear
5- Palavras-chaves (máximo 5 palavras)	
• Conversão de energia	• Controle
• Acumulador	• Modelagem
• Geração de energia	

Cabo de Santo Agostinho, 03 de fevereiro de 2022.

Coordenador: Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva
(SIAPE: [1366580])

6- Participantes docentes:

Nome:	Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva
CPF:	014.449.984-39
E-mail:	italo.rogersilva@ufrpe.br / italo@cear.ufpb.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☒ Colaborador ☐

Nome:	Flávio da Silva Vitorino Gomes
CPF:	902.422.034-34
E-mail:	flavio@cear.ufpb.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	Marcel Ayres de Araújo
CPF:	073.962.546-20
E-mail:	marcel.araujo@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	Camila Seibel Gehrke
CPF:	014.352.870-02
E-mail:	camila@cear.ufpb.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

II- DETALHAMENTO DO PROJETO

1. Resumo

No atual cenário energético, a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis é uma solução eficaz para suprir a demanda energética com impacto ambiental reduzido. Neste contexto, há uma crescente demanda por sistemas de geração distribuída (GD) que, sob a perspectiva de nível de mini e microgeração, podem ser instaladas, utilizando a infraestrutura da rede elétrica existente, como sistemas de compensação de energia, segundo as Resoluções Normativas ANEEL 482/2012 e 687/2015. Atualmente, na inserção das fontes de GD à rede elétrica, de modo geral, tem-se dispensado o emprego de sistema de armazenamento de energia (SAE) em função do alto custo de aquisição de acumuladores (e.g., baterias e supercapacitores), contudo, o custo nivelado de armazenamento (levelised cost of storage - LCOS) vem reduzindo ao longo dos anos. Pesquisas apontam que o planejamento de expansão do sistema elétrico deve considerar medidas que possibilitem maior flexibilidade de operação para aumentar a confiabilidade do sistema e garantir a continuidade do fornecimento de energia em face à presença e à crescente inserção da geração renovável por fontes intermitentes como solar e eólica. No contexto da GD, a tendência é integrar os SAEs às plantas de mini e microgeração, na forma de recursos energéticos distribuídos (REDs), para complementar a geração renovável intermitente, fornecendo serviços de suporte à rede elétrica e otimizando/prolongando o fornecimento de energia elétrica. Desta forma, SAEs têm se mostrado fundamentais para suavizar a resposta de potência da geração, sendo o armazenamento eletroquímico no momento a tecnologia mais estendida em aplicações conectadas à rede. As baterias são capazes de lidar com a demanda de energia, mas sua resposta associada à entrega/absorção de picos de potência não é tão satisfatória, o que também prejudica sua vida útil. Por outro lado, o desempenho dos supercapacitores nessas condições é excelente, em comparação com sua capacidade de armazenar energia, que é reduzida. Diante das diferentes tecnologias e tipos de acumuladores de energia comerciais, há de se analisar as características operacionais e construtivas, em termos de densidade potência, dinâmica de energia, de custo (aquisição, operacional e manutenção), de impactos ambientais, entre outros, visando definir quais as tecnologias são mais adequadas para aplicação como REDs observando os diversos cenários de operação. Portanto, novos estudos e desenvolvimento de soluções para gerenciar a dinâmica dos REDs, maximizar o fornecimento de energia elétrica e avaliar os impactos decorrentes podem ser explorados. Este projeto visa realizar estudos de tecnologias de acumuladores de energia (baterias e supercapacitores) e de configurações sistemas de conversão para o processamento da energia elétrica proveniente dos REDs. As principais atividades do projeto abrangem: pesquisa e caracterização das tecnologias de acumuladores observando aplicações e serviços da GD; estudos de modelagem dos sistemas de armazenamento e de conversão para fins de simulação e de desenvolvimento de estratégias de controle; avaliação de desempenho operacional por meio de simulações em tempo real e/ou testes experimentais.

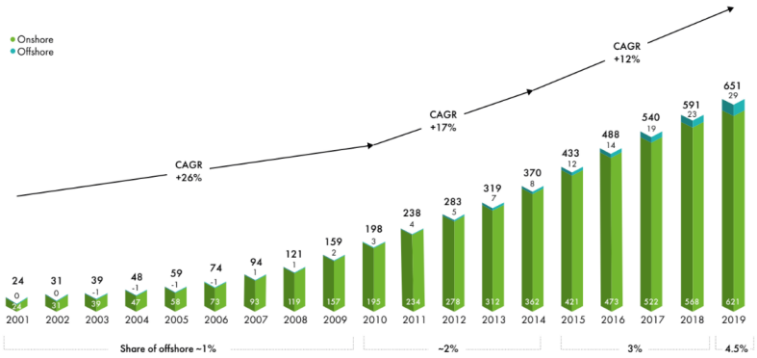
2. Introdução

Nos últimos anos, sistemas de geração eólica e solar têm atraído grande atenção no contexto mundial, experimentando um constante crescimento de novas instalações com grande inserção no mercado de

energia elétrica em virtude do desenvolvimento da tecnologia, aumento da concorrência e de uma queda de custos de capital; ademais, apresentando um declínio significativo do custo nivelado de energia elétrica (*levelized cost of energy* – LCOE) (LAZARD, 2019).

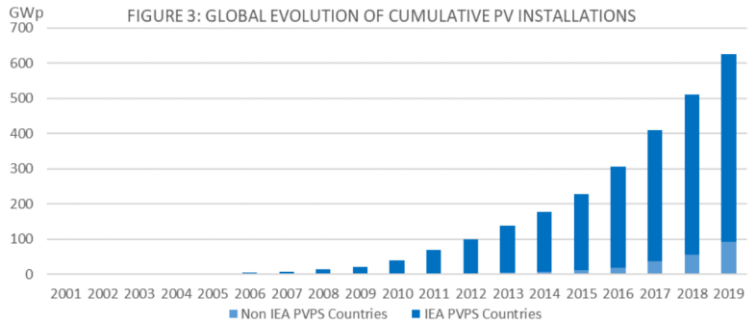
Segundo o Conselho Global de Energia Eólica (Global Wind Energy Council – GWEC), a capacidade instalada mundial acumulada continua crescendo, cf. Figura 1, com uma taxa de crescimento anual composta de 12% no horizonte dos últimos 5 anos (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC), 2020). Por outro lado, segundo a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA) por meio do programa de sistemas de energia fotovoltaica (*photovoltaic power systems programme* – PVPS), a capacidade instalada mundial acumulada de geração solar fotovoltaica ultrapassou a marca de 600 GW em 2019, cf. Figura 2. Além disso, houve um aumento no crescimento de pelo menos 114,9 GW em relação ao ano anterior de sistemas fotovoltaicos instalados e licenciados quando comparado com crescimento de 102,2 GW obtido em 2018 e de 103,4 GW obtido em 2017 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM PROGRAMME (IEA PVPS), 2020).

Figura 1: capacidade instalada mundial de energia eólica acumulada de 2001 a 2019.



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC), 2020).

Figura 2: capacidade instalada mundial de energia solar acumulada de 2001 a 2019.



Fonte: (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM PROGRAMME (IEA PVPS), 2020).

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), estima-se uma evolução da capacidade instalada de produção de energia eólica no Brasil para um total próximo de 19 GW até 2024. Ressalta-se que o subsistema Nordeste, devido à maior quantidade de parques instalados, possui geração muito próxima à geração total do SIN com 86,7% contra 10,3% do subsistema Sul (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE

ENERGIA EÓLICA (ABEEOLICA), 2019). Quanto à geração distribuída (GD), o Brasil ultrapassou a marca de 1 GW de potência instalada em mini e microgeração, do qual somente 1% advém de usinas geradoras eólicas. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a energia fotovoltaica representa cerca de 94% da geração distribuída instalada com grande perspectiva de crescimento diante da extensão e insolação do Brasil. As características climáticas e geográficas do país favorecem a implementação da geração fotovoltaica tanto em áreas urbanas ou isoladas. Além disso, o preço de painéis fotovoltaicos sofreu uma redução acentuada de cerca US$ 3,90/Wp em 2006 para menos de US$ 0,39/Wp em 2016, o que impulsionou a instalação de geradores solares distribuídos por todo o território brasileiro, chegando a atingir crescimento exponencial a partir do final de 2016 (PEREIRA et al., 2017). Em 2020, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil atingiu cerca de 3 GW de capacidade instalada de geração solar fotovoltaica distribuída, sendo o segundo maior mercado nas Américas.

Dado que o potencial para instalação de novas usinas hidrelétricas de grande porte tende a saturar nos próximos anos no Brasil, sobretudo devido aos impactos ambientais e sociais correlatos, há uma crescente demanda por sistemas de GD, em que, de modo geral, se trata como uma geração que ocorre na localidade ou perto de onde a energia elétrica é utilizada. Sob a perspectiva de nível de mini e microgeração, fontes de GD podem ser instaladas, utilizando a infraestrutura da rede elétrica existente, como sistemas de compensação de energia, segundo as Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015 da ANEEL. Atualmente, na inserção das fontes de GD à rede elétrica, de modo geral, tem-se dispensado o emprego de sistema de armazenamento de energia (SAE) em função do alto custo de aquisição de acumuladores (e.g., baterias e supercapacitores), contudo, o custo nivelado de armazenamento (levelised cost of storage - LCOS) vem reduzindo ao longo dos anos.

Pesquisas apontam que o planejamento de expansão do sistema elétrico deve considerar medidas que possibilitem maior flexibilidade de operação para aumentar a confiabilidade do sistema e garantir a continuidade do fornecimento de energia em face à presença e à crescente inserção da geração renovável por fontes intermitentes como solar e eólica. No contexto da GD, a tendência é integrar os SAEs às plantas de mini e microgeração, na forma de recursos energéticos distribuídos (REDs), para complementar a geração renovável intermitente, fornecendo serviços de suporte à rede elétrica e otimizando/prolongando o fornecimento de energia elétrica.

Vale destacar que a forma mais eficiente e confiável de integrar REDs (solar, eólico e de armazenamento) à rede elétrica, para a transferência da energia gerada, é mediante conversores estáticos de potência. O sistema de conversão permite controlar instantaneamente potência ativa e reativa, gerenciar a energia armazenada em acumuladores, minimizar perturbações elétricas oriundas de intermitências das fontes renováveis, entre muitas outras funcionalidades. Adicionalmente, o armazenamento de energia é um dos elementos-chave no desenvolvimento de uma rede inteligente, sendo talvez o segmento mais relevante e em evolução devido ao seu papel em fornecer novos valores e serviços críticos ao sistema elétrico de potência (SEP) (MOLINA, 2017).

Integrar SAEs ao SEP cria uma ponte para atender aos requisitos de potência/energia, dissociando tempo de geração e consumo. Neste contexto, SAEs permitem: 1) elevar a eficiência, armazenando energia em horários fora de ponta, descarregando em horários de maior demanda; 2) elevar a confiabilidade da rede (provimento de serviços de suporte à rede elétrica); 3) melhorar a qualidade da energia em pontos

críticos. Do ponto de vista do SEP, os REDs podem atuar como nós ativos para, por exemplo, dar suporte a: 1) fontes intermitentes de geração, complementando potência da carga quando necessário; 2) rede elétrica (concessionárias), operando na redução do pico de demanda (*peak shaving*), deslocamento da demanda, regulagem de tensão e frequência; 3) usuários finais (setores industriais e comerciais), dispondo do gerenciamento da energia elétrica produzida ou armazenada pelo lado da demanda. Assim, pode-se destacar que a inserção de REDs permite fornecer energia elétrica necessária durante horários de maior demanda, reduzindo ou postergando investimentos de concessionárias, por exemplo, na ampliação de linhas de transmissão e distribuição. Pelo lado da demanda, pode-se armazenar energia elétrica em horários fora de ponta para ser utilizada em horários de ponta de modo a reduzir custos para os usuários finais.

Desta forma, SAEs têm se mostrado fundamentais para suavizar a resposta de potência da geração, sendo o armazenamento eletroquímico no momento a tecnologia mais estendida em aplicações conectadas à rede. As baterias são capazes de lidar com a demanda de energia, mas sua resposta associada à entrega/absorção de picos de potência não é tão satisfatória, o que também prejudica sua vida útil. Por outro lado, o desempenho dos supercapacitores nessas condições é excelente, em comparação com sua capacidade de armazenar energia, que é reduzida. Diante das diferentes tecnologias e tipos de acumuladores de energia, há de se analisar as características operacionais e construtivas, em termos de densidade potência, dinâmica de energia, de custo (aquisição, operacional e manutenção), de impactos ambientais, entre outros, visando definir quais as tecnologias são mais adequadas para aplicação como REDs observando os diversos cenários de operação.

Por fim, a inserção em massa de REDs representa quebras de paradigmas e transformações (modernização) do setor elétrico, de modo que implicará em novas práticas de planejamento da expansão e operação das redes elétricas e da geração de energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2018). Portanto, novos estudos e desenvolvimento de soluções para gerenciar a dinâmica dos REDs, maximizar o fornecimento de energia elétrica e avaliar os impactos decorrentes podem ser explorados.

Com base em metodologias reportadas na literatura e de soluções comerciais, este projeto visa realizar estudos sobre tecnologias de acumuladores de energia (baterias e supercapacitores) e de configurações sistemas de conversão para o processamento da energia elétrica proveniente dos REDs. As principais atividades do projeto abrangem: pesquisa e caracterização das tecnologias de acumuladores observando aplicações e serviços da GD; estudos de modelagem dos sistemas de armazenamento e de conversão para fins de simulação e de desenvolvimento de estratégias de controle; avaliação de desempenho operacional por meio de simulações em tempo real e/ou testes experimentais.

3. Objetivos

Geral:

Desenvolver estudos para otimizar o processo de conversão e de armazenamento de energia na GD, considerando o controle do fluxo da potência gerada a partir de fontes renováveis (solar e eólica) e o gerenciamento da energia armazenada em acumuladores de energia (baterias e supercapacitores).

Específicos:

1. Implementar uma metodologia analítica de seleção de tecnologias de acumuladores observando critérios e requisitos da GD;
2. Modelar e dimensionar os REDs e o sistema de conversão conectado com a rede elétrica;
3. Estudar e implantar melhorias no processo de conversão e de armazenamento, seja por meio do desenvolvimento de novas estratégias de controle, de novas configurações de sistemas de conversão ou de novas tecnologias de acumuladores de energia elétrica;
4. Levantar e analisar requisitos para quantificar o impacto em diferentes cenários da inserção individualizada e conjunta de fontes intermitentes e SAEs;
5. Simular os sistemas estudados e propostos para validação dos modelos matemáticos e avaliar o desempenho operacional no simulador em tempo real OPAL-RT;
6. Desenvolver e realizar testes dos sistemas propostos a partir de plataformas experimentais.

4. Metodologia

Em termos gerais, este projeto será desenvolvido seguindo interativamente os seguintes procedimentos: pesquisa e análise dos trabalhos bibliográficos no tema; identificação dos aspectos dos sistemas a serem melhorados (i.e., identificação do problema); elaboração de propostas de melhoramento (i.e., elaboração de soluções); desenvolvimento de modelos dinâmicos e de regime permanente; avaliação por simulação *offline* e em tempo real dos sistemas propostos; implementação prática dos sistemas em laboratório e realização de testes; documentação e elaboração de relatórios e artigos para divulgação e da dissertação de mestrado. O período de execução deste projeto é de 48 meses. As atividades desenvolvidas para cada etapa do projeto são descritas a seguir, como também apresentadas por meio de um cronograma de atividades, conforme a Seção 6. Ao longo de todo o projeto, serão realizadas as etapas descritas a seguir.

1. *Revisão e atualização bibliográfica*: visa realizar uma avaliação do estado da arte de sistemas de GD e arranjos de acumuladores que venham permitir a definição de sistemas de armazenamento e de conversão de energia.
2. *Caracterização de tecnologias e arranjos de acumuladores:* visa implementar algoritmos (de regressão, de classificação, de hierarquização e/ou de decisão multicritério) para caracterização, e posterior seleção, das tecnologias e arranjos de acumuladores observando aspectos técnicos, ambientais, construtivos por exemplo, bem como aspectos particulares de aplicação da GD.
3. *Proposição de melhorias na conversão e no armazenamento de energia elétrica*: visa propor novas topologias de sistemas de conversão e soluções para prolongar a vida útil de sistemas de armazenamento, buscando prioritariamente um sistema eficiente e que forneça alta qualidade de energia.
4. *Simulação:* visa avaliar quantitativa e qualitativamente os sistemas propostos. Nesta etapa, os modelos matemáticos serão validados a partir de seus modelos discretos, utilizando *softwares* de simulação matemática (e.g., Matlab/Simulink e PSIM), para implementação das estratégias de controle e, por conseguinte, comparação com sistemas convencionais.
5. *Validação*: visa avaliar os circuitos simulados e as estratégias de controle com dinâmicas em tempo real, utilizando o simulador OPAL-RT. Nesta etapa, visa-se verificar os modelos e as estratégias implementadas no simulador OPAL-RT a partir de testes de prototipagem rápida de controle (*rapid control prototyping* – RCP) e validação em uma plataforma *hardware-in-the-loop* (HIL).

6. *Experimentação*: visa desenvolver plataformas e testes experimentais para confirmação dos estudos realizados com simulação *offline* e em tempo real. Prosseguindo da fase de validação, nesta etapa, plataformas experimentais serão montadas para representar em escala reduzida ou mesmo em escala real os cenários trabalhados em simulação. Testes em *power hardware-in-the-loop* (PHIL) permite que o ambiente de simulação em tempo real troque energia com sistemas físicos ou dispositivos reais (conversores, máquinas elétricas, baterias, painéis solares etc.).
7. *Elaboração de relatórios, artigos e dissertação*: visa registrar e compilar as atividades realizadas durante a execução do projeto para composição da dissertação de mestrado, e redigir artigos para serem submetidos a periódicos indexados e congressos de valor reconhecido.

5. Resultados esperados

O desenvolvimento deste projeto possibilitará a realização de pesquisas que contemplarão desde os princípios físicos envolvidos na captação da energia renovável, passando pelo processo de conversão e de armazenamento em acumuladores, até o acoplamento com a rede elétrica, buscando analisar os aspectos de viabilidade técnica, econômica e ambiental de cada processo. A partir da simulação e implementação experimental dos estudos realizados, enseja-se que os resultados deste projeto possam ser efetivamente incorporados pela sociedade em termos de inovação de processos/metodologias e/ou novos equipamentos. Ademais, espera-se obter os seguintes resultados no período de quatro anos de execução do projeto: a publicação de pelo menos 4 artigos em eventos científicos de qualidade reconhecida e/ou a publicação de pelo menos 2 artigos periódicos indexado de valor Qualis igual ou superior a B1 (conforme quadriênio 2013-2016).

6. Cronograma de atividades

Semestre / Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8
I	X	X	X	X	X	X	X	
II	X	X	X	X				
III				X	X	X	X	
IV			X	X	X	X	X	
V					X	X	X	X
VI					X	X	X	X
VII	X	X	X	X	X	X	X	X

Atividade I	Revisão e atualização bibliográfica
Atividade II	Caracterização de tecnologias e arranjos de acumuladores
Atividade III	Proposição de melhorias na conversão e no armazenamento de energia elétrica

Atividade IV	Simulação
Atividade V	Validação
Atividade VI	Experimentação
Atividade VII	Elaboração de relatórios, artigos e dissertação

7. Apoio financeiro e/ou institucional

Este projeto será conduzido em parceria com professores da UFRPE e da UFPB, os quais possuem participação conjunta em projetos financiados, grupos de pesquisa e artigos publicados.

8. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEOLICA). **Boletim Anual de Geração Eólica 2019**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://abeeolica.org.br>. Acesso em: 30 jun. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Distributed Energy Resources: Impacts on Energy Planning StudiesN° EPE-DEA-NT-016/2018-r0**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-en/sala-de-imprensa/noticias/Documents/Discussion Paper - Distributed Energy Resources.pdf>.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global Wind Report 2019**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.gwec.net>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM PROGRAMME (IEA PVPS). **2020 Snapshot of Global PV Markets**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.iea-pvps.org>. Acesso em: 30 jun. 2020.

LAZARD. **Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 13.0**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019>.

MOLINA, M. G. Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid. **Proceedings of the IEEE**, [s. l.], v. 105, n. 11, p. 2191–2219, 2017. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8038773/>

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. **Inpe**, [s. l.], v. 2, p. 80, 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html>