

PPGEAS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

Últimas defesas

Confira as últimas defesas de mestrado e doutorado de alunos do PGEAS

P. 68

Time do PPGEAS

Conheça a trajetória dos professores Marcelo Stemmer e Alexandre Trofino

P. 69

Pesquisas do PPGEAS

Confira as últimas pesquisas em energias renováveis pelo PPGEAS

P. 5

Energias Renováveis



Equipe

Comissão editorial

- Enio Snoeijer
- Felipe Cabral
- Julio Normey-Rico
- Livia Scheffer

Histórico de coordenações

- Eugênio B. Castelan / Edson R. De Pieri (2007 - 2010);
- José E. R. Cury / Eugênio B. Castelan (2010 - 2012);
- Jomi Fred Hübner / José E. R. Cury (2012 - 2014);
- Rômulo S. de Oliveira/ Jomi Fred Hübner (2014 - 2016);
- Daniel F. Coutinho / Rômulo S. de Oliveira (2016 - 2018);
- Werner Kraus Junior / Jomi Fred Hübner (2018 - 2020);
- Werner Kraus Junior / Jomi Fred Hübner (2020 - 2022).

Conteúdo

<u>Editorial</u>	<u>4</u>
<u>5</u> Energias renováveis	
Conheça as iniciativas de pesquisa do PPGEAS em energias renováveis.	
<u>Controle, Automação e Energias renováveis</u>	<u>6</u>
<u>Manufatura Circular Digital</u>	<u>9</u>
<u>Energia termossolar, coletores Fresnel e os desafios da geração sustentável de eletricidade</u>	<u>14</u>
<u>Controle e Instrumentação Aplicados a Redes Inteligentes Integradas com Fontes de Energia Renovável</u>	<u>20</u>
<u>Controle Ótimo de Plantas de Energia Solar Concentrada Operando com Sistema de Armazenamento Térmico ..</u>	<u>22</u>
<u>Um Paradigma para o Futuro da Geração de Energia Sustentável no Brasil</u>	<u>28</u>
<u>Um Sistema de Gerenciamento de Energia QoE-aware baseado em CP</u>	<u>36</u>
<u>Operação Ótima de Coletores Solares Térmicos usando Controle Hierárquico Baseado em Exergia</u>	<u>44</u>
<u>Sistemas de geração distribuída, microrredes e controle de conversores de eletrônica de potência</u>	<u>52</u>
<u>Projeto UFSCkite: aerogeradores com asas cabeadas</u>	<u>60</u>

68

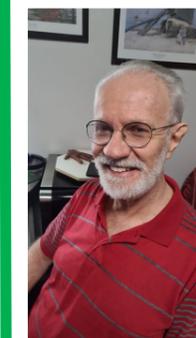


Defesas

Fique por dentro das últimas defesas de mestrado e doutorado

69 Time PPGEAS

Conheça a trajetória dos Professores Marcelo Stemmer & Alexandre Trofino



Editorial

O tempo passa rápido e nossa revista já está fazendo dois anos; o número 4 já está chegando na sua casa!

Neste número, a Revista do Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas (PPGEAS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) traz como tema central as pesquisas realizadas no programa em “Energias Renováveis”, assunto de grande relevância pelo seu impacto na preservação do meio ambiente e na transformação do mundo para um sistema mais sustentável. Mas também, trata-se de um tema crucial para o desenvolvimento científico e econômico do país. O Brasil é um país que se destaca por possuir uma matriz energética com grande participação de energias renováveis (ER), já que 48% da energia consumida no país é gerada com fontes hidrelétricas, biocombustíveis, biomassa, solar e eólica. Esse indicador é mais de três vezes superior à média mundial, dado que a maioria dos países possuem uma matriz majoritariamente composta por combustíveis fósseis.

O setor de energias renováveis vem sofrendo grandes mudanças com desenvolvimento de novos sistemas de geração e consumo. Muitas universidades no nosso

país realizam pesquisas direcionadas ao setor de ER, estudando novos processos, regulamentações, sistemas de controle e gestão da energia, entre outros. No PPGEAS, vários pesquisadores participam de projetos na área, e nesta edição da revista trazemos um panorama geral das ERs no Brasil e no mundo por meio de vários artigos com os resultados gerados nos estudos e pesquisas realizadas.

E temos outras matérias muito interessantes! Na série “Conhecendo o time do PPGEAS”, vamos conhecer a trajetória acadêmica, profissional e as experiências de vida de dois docentes do programa, que estão na nossa universidade há mais de 25 anos.

Finalmente, como é tradição na revista, você também confere nesta edição as últimas notícias das atividades realizadas pelos discentes e docentes no último semestre; ainda, fique por dentro dos resultados das pesquisas através das teses e dissertações defendidas, e muito mais!

Boa leitura! Equipe Revista PPGEAS.

Energias

Renováveis

O tema Energias Renováveis está no foco de diversos centros de pesquisa e tende a ser cada vez mais relevante na matriz energética mundial. O Brasil e o PPGEAS atuam nessa área e você poderá conferir algumas das pesquisas desenvolvidas.



Autor: Prof. Julio Elias Normey-Rico

Uma fonte de energia é dita renovável se possui a capacidade de se repor naturalmente no meio ambiente. Exemplos destas energias são a solar, a eólica, a da biomassa ou a das ondas do mar. Nem toda energia renovável provém de uma fonte inesgotável como o sol, ou das forças do mar, mas algumas dependem de como seja o processo de geração e utilização, como é o caso da biomassa. O impacto ambiental destas energias tende a ser menor que o das energias ditas não renováveis, mas a análise desse ponto deve considerar todo o processo e não apenas a etapa de geração. Atualmente, a participação das energias renováveis na matriz energética mundial e do Brasil vem aumentando, seja pelo uso de geração centralizada, como nas usinas fotovoltaicas ou eólicas, seja pelo uso da geração distribuída, com equipamentos domésticos para geração de energia nas residências ou condomínios. O Brasil, graças a grande participação da energia hidrelétrica, do uso do etanol e da biomassa para produzir energia elétrica, destaca-se no cenário internacional com aproximadamente 40% da energia total do país, gerada de forma renovável (a média no mundo está abaixo de 15%). Mas ainda há um longo caminho a percorrer para tornar viável, tecnicamente e economicamente, o uso destas energias de forma massiva em todo o planeta.

A utilização dessas fontes de energia requer o desenvolvimento de novas tecnologias e, por se tratar de um processo multidisciplinar, diversos estudos em diferentes campos da engenharia se fazem necessários. Entre eles, a Engenharia de Controle e Automação tem se tornado, cada dia mais, uma área muito importante para o desenvolvimento dos sistemas de geração e gestão destas energias. Algumas das áreas onde esta engenharia atua são: (i) sistemas de controle, necessários para o funcionamento de turbinas eólicas ou conjunto de painéis fotovoltaicos; (ii) sistemas de

gerenciamento energético, para a utilização de forma ótima a energia gerada, definindo quanto e quando deve ser armazenado ou consumido; (iii) sistemas de controle, para o correto funcionamento dos sistemas de conversão AC/DC e DC/DC usados pelos diversos equipamentos para se conectar à rede; (iv) sistemas hardware e software de alto desempenho, para a comunicação entre equipamentos e o processamento dos algoritmos de controle em tempo real. Ainda, novos desafios surgem a cada ano, como a operação com controle das cargas, a adaptação dos sistemas de controle às novas regulamentações das agências reguladoras, etc. Assim, o campo para pesquisas nesta área, tão importante para o desenvolvimento do país e do mundo, continua se ampliando, e os professores e estudantes do PPGEAS vem realizando diversos estudos e pesquisas. Na sequência, detalhamos alguns dos tópicos estudados e listamos os projetos de pesquisa desenvolvidos ou em desenvolvimento no PPGEAS, muitas vezes em parceria com empresas e outras com financiamento nacional ou internacional.

Pesquisas em sistemas de energia solar

A energia solar pode ser aproveitada para gerar eletricidade ou calor. Há duas formas de aproveitamento da energia solar: a fotovoltaica e a térmica. A geração fotovoltaica utiliza painéis com células fotovoltaicas que, por meio do “efeito fotoelétrico”, produzem eletricidade a partir da luz solar que incide nelas. A energia solar térmica utiliza a energia do sol para aquecer um fluido térmico que circula por painéis solares expostos à irradiação solar. Este fluido térmico pode ser então usado para diversos fins, como aquecimento, geração de vapor, etc. Um uso bastante difundido é na geração de vapor a alta pressão, que

se utiliza para gerar energia elétrica em uma central térmica.

Pesquisas em Energia Eólica

O vento é um recurso energético renovável e, portanto, inesgotável. Em algumas regiões do planeta, sua frequência e intensidade são suficientes para geração de eletricidade por meio de equipamentos específicos para essa função. Basicamente, os ventos ativam as turbinas dos aerogeradores, fazendo com que eles convertam a energia mecânica produzida em energia elétrica.

Pesquisas em Energia Hidrelétrica

A energia hidrelétrica é aquela gerada a partir do movimento das águas dos rios, com a instalação de turbinas hidrelétricas acopladas a geradores elétricos, que são equipamentos capazes de converter o movimento da água em energia elétrica. Existem principalmente duas formas de uso desta energia: diretamente instalando o sistema turbina-gerador no calce do rio, aproveitando o movimento natural da água; ou com a construção de barragens, que permitem o uso de comportas para controlar a vazão que aciona as turbinas. No Brasil, encontra-se instalado um grande número de usinas hidrelétricas, que são responsáveis por aproximadamente 80% da energia elétrica consumida no país. Apesar de ser uma energia limpa e barata, sofre com a sazonalidade das chuvas, que afetam o volume de água dos reservatórios e a vazão de água dos rios. Este tipo de energia pode ser obtida através de Centrais Geradoras Hidrelétricas, Pequenas Centrais Hidrelétricas ou Usinas Hidrelétricas e, em todos os casos, torna-se necessário o uso de sofisticados sistemas de controle e automação para a correta operação das unidades geradoras, que devem respeitar diversos requisitos, por exemplo, em termos de frequência e tensão da energia gerada.

Pesquisas em Energia de Biomassa

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e tem grande produção de cereais e madeiras. Todos estes setores industriais se caracterizam por produzirem uma grande quantidade de resíduos orgânicos, que podem ser tratados como bio-fontes de energia. Por exemplo, na indústria da cana de açúcar três principais resíduos podem ser usados para geração de energia: o bagaço, o palhiço (palha) e a vinhaça. O bagaço (fibra que sobra depois do processo de moagem para extrair o caldo açucarado) é o principal resíduo da cana e é comumente usado como combustível de queima para caldeiras, para gerar vapor que tem vários usos, inclusive, à geração de energia elétrica; o palhiço também pode ser queimado junto com o bagaço; já a vinhaça, resíduo da destilação do etanol, pode ser usada para gerar biogás. De forma similar, os resíduos de outras indústrias (casca do arroz, restos de madeira) podem ser usados como biomassa para queima.

Formação de Recursos Humanos—PRH ANP 2.1

Dentro do PPGEAS funciona o Programa PRH 2.1, financiado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), e gerido pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). O PRH 2.1 oferece suporte a algumas atividades nas áreas de renováveis, em especial, as que suportam a descarbonização e o uso de biocombustíveis. Dele participam vários professores do PPGEAS e estudantes de graduação, mestrado, doutorado e pós doutorado. <https://prhautomacao.ufsc.br/>

Projetos de Pesquisa do PPGEAS

- Controle preditivo, compensação de atraso e otimização: teoria e aplicações no setor energético. Financiamento: CNPq.

- Optimization and Control of Hybrid Generation Power Systems Including Renewable Sources. Financiamento: CNPq.
- Rede de Pesquisa Autrascaña. Financiamento: Programa de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento - CYTED.
- Projeto Optimazucar. Financiamento: Programa de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento - CYTED.
- Controle Preditivo na Geração de Energia Elétrica. Financiamento: Reivax.
- Regulador Integrado de Tensão e Velocidade para Turbinas Hidrelétricas. Financiamento: Reivax.
- Projeto UFSCkite: Aerogeradores com aerofólios cabeados. Financiamento: CNPq.
- Filtragem e estimação para aerofólios cabeados. Financiamento: UFSC.
- Control Systems of Offshore Hydrogen Production by Renewable Energies. Financiamento: Comissão Europeia.
- Aprimoramento e Validação de Plataforma de Simulação de Plantas Heliotérmicas de Concentração Linear com Estudos de Inovação Tecnológicas. Projeto ANEEL. Financiamento: Petrobras.
- Controle avançado e otimização para sistemas de energia renovável com armazenamento de hidrogênio. Financiamento: CNPq.
- Modelagem e Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica. Financiamento: CNPq.
- Modelagem, controle e otimização de sistemas de geração de energia solar térmica. Financiamento: UFSC.
- Estratégias de controle não linear e com compensação de atraso em plantas de geração de energia solar. Financiamento: CAPES e Ministério da Educação da Espanha.
- Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables (CHROMAE). Financiamento: Ministério

de Educación da Espanha.

- Controle e instrumentação para smart grids para integração de energias renováveis. Financiamento: Pearl Electric, China State Grid e National Natural Science Foundation of China.
- Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado Convertível com Fontes de Energia Renovável. Financiamento: CNPq.

Muitos desses grupos de pesquisa estão registrados no sistema SIGPEX da UFSC:

<https://sigpex.sistemas.ufsc.br>

Grupos de Pesquisa e Redes Internacionais

Vários docentes e estudantes do PPGEAS participam de grupos de pesquisa do CNPq e redes de pesquisa internacionais descritos a seguir.

- Grupo CNPq: GPER - Grupo de pesquisa em Energias Renováveis, do Departamento de Automação e Sistemas, <http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/382530>
- RED temática Iberoamericana de pesquisa em hidrogênio: H2TRANSEL. Financiamento: Programa de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento - CYTED.
- Grupo CNPq: GPEN - Grupo de Pesquisa em Processamento de Energia. <http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/1976151540544712>

Manufatura Circular Digital¹

Autor: Prof. Ricardo J. Rabelo

Economia Circular pode ser definida como um modelo ou paradigma de produção e consumo, que envolve compartilhar, alugar, reduzir, reutilizar, reciclar, reformar, reprojeter, recuperar, remanufaturar materiais e produtos existentes o maior tempo possível, visando minimizar os efeitos globais, como mudanças climáticas, perda de biodiversidade, desperdício e poluição.

O modelo da Economia Circular surge em oposição ao modelo clássico linear básico de produzir, usar e descartar (Figura 1).

A economia circular está se tornando muito relevante à medida que cada vez mais empresas percebem o real valor e a potencial rentabilidade dessa nova e mais sustentável

forma de produzir e fazer negócios. A economia circular baseia-se em diversas estratégias que ampliam o ciclo de vida de produtos com vistas à redução de resíduos. Além disso, está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, patrocinada pela ONU, pelo que se configura como um tema de grande relevância no escopo das energias renováveis.

Para o desenvolvimento da Economia Circular, inúmeros desafios precisam ser enfrentados, como a adoção de novos modelos de negócios, adequadas normas e leis, incentivos financeiros, cultura dos consumidores, entre outros. Por outro lado, há benefícios para as indústrias, como o aumento das oportunidades econômicas, a maior eficiência opera-

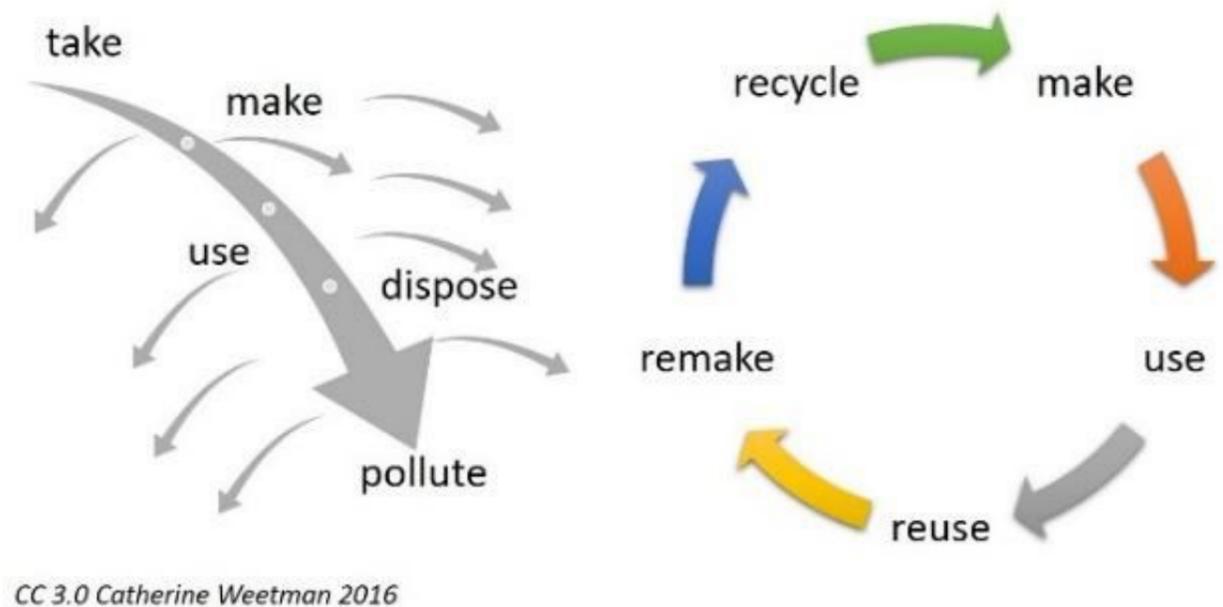


Figura 1: Comparativo básico entre os modelos linear e circular de produção.

1. Este artigo é um pequeno sumário traduzido do relatório "The 2021 World Manufacturing Report - Digitally Enabled Circular Manufacturing", publicado em outubro de 2021 pelo World Manufacturing Forum (WMF), do qual este professor participou da elaboração (https://worldmanufacturing.org/wp-content/uploads/WMF2021_E-Book_b.pdf).

O WMF (www.worldmanufacturingforum.org) é uma organização associada ao Programa "IMS - Intelligent Manufacturing Systems", apoiado pela União Europeia e ONU, e é também um órgão consultivo do WEF (World Economic Forum) para assuntos de manufatura. O WMF tem como Missão promover a inovação e o desenvolvimento do setor de manufatura visando aumentar a competitividade de todos os países.

Todos os anos o WMF escolhe um tema-base para focar e propor ações. Este ano o tema foi o da Economia Circular. Isto deveu-se à enorme e crescente relevância que as questões de sustentabilidade ambiental vêm ganhando em todas as esferas de discussões e decisões nas empresas, governos e sociedades civis do planeta.

cional através da redução de desperdícios, a criação de mais e melhores empregos, e uma contribuição para o problema das mudanças climáticas.

As tecnologias digitais representam um importante catalisador para alcançar a circularidade nas cadeias de valor de manufatura. A manufatura circular digital suporta três objetivos fundamentais: eficiência de recursos, redução de desperdícios e redução de emissões. As tecnologias digitais podem apoiar a transição para a manufatura circular no nível da empresa - que inclui desenvolvimento de produtos, produção e novos modelos de negócios - bem como no nível da rede (de empresas e parcerias). A transição para a manufatura circular vem sendo tomada como uma prioridade para muitos governos em todo o mundo.

Há uma série de facilitadores para a transição na direção da manufatura circular. Os principais facilitadores no nível do consumidor incluem a consciência ambiental, o aumento da confiança e da transparência em relação aos prestadores de serviços, a conveniência e acessibilidade de produtos sustentáveis e a alfabetização digital. No nível da empresa, os facilitadores incluem a demanda por produtos sustentáveis, as tecnologias digitais, as habilidades circulares, entre outros. No nível da cadeia de valor, há necessidade de melhorar o compartilhamento de dados, a infraestrutura e as redes de telecomunicações, além de padronizar requisitos.

Manufatura Circular—Estado da Prática

Como paradigma emergente no contexto do zero desperdício, a Manufatura Circular reforça o reaproveitamento de recursos na for-

ma de materiais e energia através de sistemas sociotécnicos e do uso intenso de informações. Isso permite um gerenciamento mais efetivo de todo o ciclo de vida de um produto fabricado, via projeto de engenharia e fabricação, de serviços, manutenção e recuperação, sustentando assim futuros negócios.

Até o momento não há uma definição abrangente e universalmente aceita de economia circular, quando muitos países usam suas próprias interpretações ou conceitos desenvolvidos por organizações relevantes. Isso pode afetar potencialmente uma ação internacional globalmente coerente e a aplicação consistente de diretrizes, políticas e sinergias entre ações de diferentes atores importantes. No entanto, a economia circular está rapidamente se tornando uma forte tendência e em rápida expansão à medida que um número crescente de empresas percebe nela também um valor adicional dessa nova maneira sustentável de fazer negócios.

Assim, a economia circular trata-se de um modelo regenerativo, no qual as indústrias encontram formas de usar materiais e bens por um período de tempo estendido, criando mais de um ciclo de vida do produto, alimentado por novas tecnologias digitais e novos modelos de financiamento, constituindo bases para uma grande inovação: a economia circular para as indústrias. Esse tipo de inovação constitui o cerne do que significa ser humano: possibilitar a criação de riqueza e bem-estar da sociedade, mas com respeito ao planeta, apoiando sua sobrevivência para as gerações futuras.

As indústrias estão no centro desta nova revolução e seus esforços são fundamentais para mudar aos modelos circulares. Além disso, as indústrias podem influenciar os hábitos de consumo e de descarte dos consumidores por meio de suas propostas de valor aos

clientes, enfatizando e considerando o meio ambiente.

O futuro da manufatura começa a ver um desenvolvimento gradual em direção a uma indústria circular de alta qualidade, na qual a demanda por matérias-primas escassas é atendida por matérias-primas da cadeia de valor sempre que possível, considerando cinco metas estratégicas.

1. Redesenhar produtos e selecionar de materiais adequados para reutilização

A mudança para uma economia circular começa com a reformulação do projeto inicial e fabricação do produto, considerando a segunda reutilização de vida do produto ou a reciclagem dos materiais. Um exemplo disso pode ser a mudança de matérias-primas críticas, como metais e minerais, para matérias-primas geralmente disponíveis voltadas para produtos mais complexos.

2. Conservar e recuperar recursos dos produtos usados e usá-los na fabricação de novos produtos

Cada vez mais os fabricantes estão aproveitando novas oportunidades oferecidas pela Internet das Coisas (IoT) e, em alguns casos, mudando para um modelo voltado em serviços no processo. Nesse sentido, as indústrias devem desenvolver processos e sistemas para retomar e reformar bens para um segundo ciclo de vida. Aqui, a tecnologia de rastreamento pode revolucionar a capacidade delas de fazer isso. Eles precisam entender os fluxos de materiais para que possam planejar e facilitar o próximo ciclo, otimizar os processos de produção e melhorar o atendimento ao cliente.

3. Desenvolver novas formas de produção

As demandas da Manufatura Circular implicam mudança em materiais, máquinas, produtos e processos, todos os quais impactam o projeto do trabalho. A futura economia global de produtos e serviços exige grandes volumes de matérias-primas e energia. Para isso, há uma necessidade de novos sistemas de produção que usem tecnologias de impressão sofisticadas e incluam produtos feitos de materiais adaptativos e de mudança de forma que

possam prolongar sua vida útil.

4. Implementar um modelo baseado em serviços para produtos circulares

Juntamente com o lado da oferta, a demanda por produtos e serviços circulares precisará aumentar para completar os casos de uso de negócios circulares. Empresas e governos desempenham um papel fundamental nisso, adotando aquisições socialmente responsáveis. No passado, as indústrias vendiam ativos aos clientes. No entanto, em um mundo onde as pessoas querem minimizar o desperdício, é melhor para os fabricantes manter a propriedade em vez de apenas vender um serviço para o cliente, alugando o produto. Para os clientes, isso tende a significar que eles recebem um melhor serviço com manutenção e qualidade. As indústrias, por sua vez, garantem que mantêm o produto em linha e em boas condições antes do próximo ciclo.

5. Mudar de matéria-prima fóssil para renovável e eliminar o uso de produtos químicos tóxicos

A economia circular é um sistema industrial que nasce já na intenção e projeto dos produtos das indústrias. Substitui o conceito de fim de vida de um produto por restauração; muda para o uso de energia renovável, elimina o uso de produtos químicos tóxicos que prejudicam o seu reaproveitamento e elimina resíduos através de um melhor projeto de materiais, produtos, sistemas e modelos de negócios.

Dez Recomendações para a Circularidade

Abaixo, são listadas dez recomendações-chave sugeridas para promover uma mentalidade circular e incutir responsabilidade nos consumidores, criar políticas que abordem desafios relacionados a uma transição circular digital, construir uma força de trabalho proficiente com as habilidades e competências adequadas ao paradigma e promover a colaboração para o estabelecimento de cadeias de va-

Five Strategic Goals of Circular Manufacturing
(Source: World Manufacturing Foundation)



Redesign Products & Materials Selection



Conserve & Recover Resources



Develop New Ways of Production



Implement Service-based Model



Shift to Renewable Raw Materials

lor circulares. Dentro de cada recomendação-chave há três medidas que detalham como isso pode ser feito.

1. Promover uma mentalidade circular na empresa, que abrace as oportunidades da economia circular e o seu papel de viabilização de tecnologias digitais

- Reforçar a real importância da transição circular é uma obrigação.
- Definir novos indicadores-chave de desempenho relacionados à circularidade.
- Educar os cidadãos sobre o consumo sustentável.

2. Reforçar a responsabilidade, proatividade e tomada de decisão consciente do consumidor

- Reforçar a conscientização sobre a circularidade e o impacto ambiental do consumo.
- Procurar adquirir produtos apenas de empresas sustentáveis.
- Estimular a economia compartilhada para aumentar a utilização de produtos.

3. Permitir a cooperação entre as partes interessadas na construção de cadeias de valor circulares

- Facilitar o compartilhamento de informações na cadeia de valor.
- Promover o compartilhamento de padrões certificações e métricas comuns de sustentabilidade.
- Envolver todas as partes interessadas relevantes na implementação das soluções tecnológicas e digitais.

4. Promover modelos de negócios e proposições de valor que abracem a circularidade

- Incentivar modelos de produto-serviço.
- Projetar produtos para facilitar a eventual recuperação, remanufatura e reutilização.
- Explorar plataformas de simbiose industri-

al para comercializar resíduos e ativos excedentes.

5. Implementar globalmente políticas que reconheçam as tecnologias digitais como fundamental facilitador para a manufatura circular

- Aumentar o compromisso com iniciativas globais para a economia circular.
- Abordar a divisão digital global, especialmente em países menos desenvolvidos.
- Configurar ambientes de testes reais para promover o aprendizado, a experimentação e a inovação de iniciativas circulares.

6. Promover medidas econômicas que impulsionem a transição para a economia circular e a adoção de tecnologias habilitadoras

- Elaborar esquemas de tributação para impulsionar a eficiência dos recursos e o uso de materiais secundários.
- Incentivar empresas e investidores que financiam projetos circulares.
- Fornecer incentivos aos consumidores para impulsionar o comportamento circular.

7. Treinar a força de trabalho para a manufatura circular digital

- Atualizar habilidades e competências para trabalhar com tecnologias digitais.
- Preparar a força de trabalho para ocupações verdes emergentes.
- Reforçar o componente de sustentabilidade nos currículos escolares.

8. Usar dados para apoiar a transição circular no setor manufatureiro

- Promover uma cultura baseada em dados nas organizações.
- Explorar dados da cadeia de valor para impulsionar a inovação de produtos e produção sustentável.
- Criar repositórios de dados compartilhados

que facilitem o uso de dados confiável entre empresas.

9. Capacitar as PMES (pequenas e médias empresas) em sua transição para a manufatura circular

- Abordar a falta de informação sobre o potencial das tecnologias para alcançar a circularidade.
- Fornecer capital e auxiliar na construção de mão de obra qualificada.
- Aumentar o acesso a dados para apoiar objetivos circulares e alavancar novas oportunidades de negócios sustentáveis.

10. Abortar o possível impacto ambiental das tecnologias digitais

- Realizar uma avaliação holística e realista do impacto tecnológico.
- Alavancar modelos de negócios circulares para lidar com resíduos eletrônicos.
- Promover políticas para enfrentar o impacto negativo não intencional das tecnologias no meio ambiente.

Conclusões

A Economia Circular é uma oportunidade para transformar a manufatura. As possibilidades de as indústrias transformarem a produção e seus modelos de negócios são profundas, alavancando mais inovações no setor, além de ser uma chance de criar um impacto positivo no meio ambiente. Por muitos anos, a forma "linear" de fabricação, que produz muitos resíduos, aliada ao consumo social implacável, colocou uma pressão sobre o meio ambiente, esgotando os recursos finitos e agravando a crise climática.

Esses efeitos negativos terão consequências duradouras, não apenas para a geração atual, mas também as futuras. Abraçar a economia circular, portanto, é um passo na direção rumo a um futuro melhor, sustentável e não agressivo ao meio ambiente, reforçando

o papel da manufatura como um importante motor para o bem-estar social.

Porém, a transição para a circularidade na manufatura não é uma tarefa fácil. Por outro lado, um dos facilitadores está na associação com a transformação digital. Em outras palavras, é usar as modernas tecnologias de informação, de (tele)comunicações e de manufatura com as aliadas dos processos produtivos e de logística associados à circularidade. No contexto da 4ª. Revolução Industrial, abordar a perspectiva digital na manufatura acaba sendo um pré-requisito para explorar as oportunidades na economia circular e alcançar uma sustentabilidade ambiental duradoura.

É essencial reforçar que todos têm uma participação na economia circular. A Manufatura Circular só é possível se empresas, consumidores, governos e sociedade civil em geral trabalharem juntas e mudarem sua mentalidade. Empresários das indústrias devem reconhecer que a circularidade afeta todos os processos produtivos, internamente e ao longo de todas as suas cadeias de fornecimento e de valor. Empresas de tecnologia devem ser incentivadas para desenvolverem soluções de apoio aos inúmeros aspectos da circularidade. Os consumidores devem perceber e serem incentivados na sua parte de responsabilidade de reciclagem, reutilização e consumo consciente. Educadores e trabalhadores devem garantir que as habilidades certas estejam presentes para permitir a transição para a manufatura circular. As políticas devem abordar a digitalização e criar as pré-condições legais e regulatórias adequadas para a Manufatura Circular. As instituições públicas e privadas de fomento, investimento e financiamento devem privilegiar aportes e incentivos a organizações ambientalmente responsáveis. Em suma, cada um de nós deve fazer a sua parte. A transição para a Manufatura Circular é uma das formas mais efetivas da engenharia e da sociedade como um todo como forma de contribuição para um planeta sustentável e ecologicamente correto. ■

Energia termossolar, coletores Fresnel e os desafios da geração sustentável de eletricidade

Autores: Adriano S. Brandão (doutorando PPGEAS) e Prof. Julio E. Normey-Rico

Esta pesquisa vem sendo desenvolvida no contexto do doutorado de Adriano Brandão, do grupo de pesquisas em energias renováveis.

Contextualização

O uso de fontes de energias renováveis e com baixa emissão de gases do efeito estufa é cada vez mais relevante na matriz energética mundial, como mostrado na Figura 1. Este comportamento é motivado principalmente pelos esforços para diminuir o impacto ambiental dos processos industriais e cumprir as metas de aquecimento global estabelecidas no acordo de Paris.

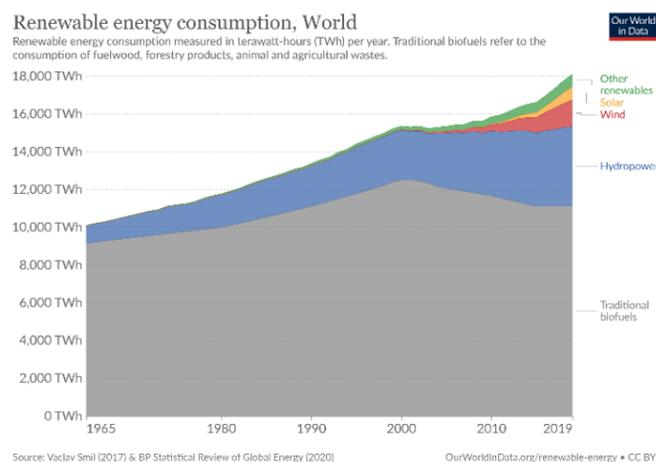


Fig. 1: Consumo energético mundial, estratificado por tipo de fonte energética.

Dada a dimensão colossal de energia solar que incide na Terra (em média, 240 Watts por metro quadrado), esta fonte tem destaque no contexto de energias renováveis e existe um grande esforço científico para projetar equipamentos e processos de aproveitamento da energia solar.

Existem duas principais formas de gerar eletricidade a partir da irradiação solar:

- A partir do efeito fotovoltaico, utilizando células fotossensíveis para gerar uma corrente elétrica contínua. Estes processos são chamados de fotovoltaicos, comumente referidos pela sigla PV, do inglês *Photovoltaic*;

- Utilizando um processo similar ao de termelétricas convencionais com um ciclo termodinâmico, turbina e gerador. Nesse caso, o calor que alimenta este ciclo provém da concentração da irradiação solar para aquecer direta ou indiretamente o fluido do processo. Estes processos são ditos de concentração solar, comumente referidos pela sigla CSP, do inglês *Concentrating Solar Power*.

Ambas tecnologias têm sido intensamente pesquisadas, de forma a torná-las economicamente competitivas quando comparadas com as fontes tradicionais de energia, como carvão e gás. Para comparar os custos associados a processos tão diferentes, existe um indicador do custo nivelado para gerar cada megawatt, comumente referido pela sigla LCOE, do inglês *Levelized Cost of Energy*. A Figura 2 apresenta a evolução do LCOE de diferentes processos de geração elétrica renovável.

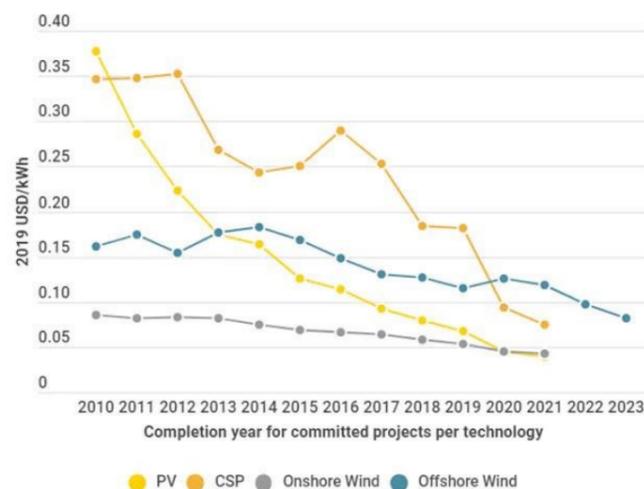


Fig. 2: LCOE de fontes renováveis de energia.

Desafios da geração a partir da irradiação solar

É notável que os avanços e o aumento do uso das tecnologias que utilizam diretamente a irradiação solar (PV e CSP) diminuíram consideravelmente o custo associado a estes processos, mas, como é comum em processos de

geração elétrica com fontes renováveis, existem outros fatores que tornam a utilização destas fontes energéticas mais difícil. Uma grande limitação é geográfica, tendo em vista que a incidência solar varia muito ao redor do mundo, não só favorecendo regiões mais próximas à linha do equador, mas também áreas que tenham baixa formação de nuvens, poeira, etc. Outra grande desvantagem destes processos é a intermitência inerente aos ciclos de dia e noite ou passagem de nuvens, o que dificulta a programação da produção e operação destas plantas solares.

Como forma de mitigar o problema da intermitência, uma das soluções possíveis é o superdimensionamento dos processos, permitindo geração energética mais alta que a demanda no período de operação, associado ao uso de sistemas de armazenamento do excesso da energia gerada. Com o armazenamento da energia excedente, seria possível suprir a demanda energética mesmo em períodos de irradiação solar insuficiente.

Este tipo de proposta motiva vários estudos de projeto ótimo e viabilidade econômica, tendo em vista que os custos de implementação e operação de um processo superdimensionado com capacidade de armazenamento precisam ser superados pela capacidade produtiva da planta ao longo de sua vida útil. No caso de sistemas PV, o armazenamento de energia em larga escala, em geral, apresenta eficiência reduzida, tendo em vista que é necessário converter a energia elétrica por meio de algum tipo de processo eletroquímico, térmico ou cinético, o que acarreta perdas. Por outro lado, as tecnologias CSP permitem o armazenamento do fluido térmico diretamente, sem a necessidade de conversão para armazenamento. Esta característica dos processos termossolares motiva diversos esforços de investigação, desde projeto para melhoria da eficiência dos equipamentos a estratégias de controle para maximização do aproveitamento energético da planta.

Plantas termossolares

Os processos CSP, representados na Figura 3, tipicamente consistem de quatro seções principais: o campo solar (elemento 1 na Figura 3), o sistema de armazenamento (elementos 2 e 4 na Figura 3), a interface de troca de calor entre o ciclo de captação da energia solar e o ciclo de potência (elementos 3 na Figura 3) e o Ciclo de potência (representado pelos elementos 5, 6, 7 e 8 na Figura 3).

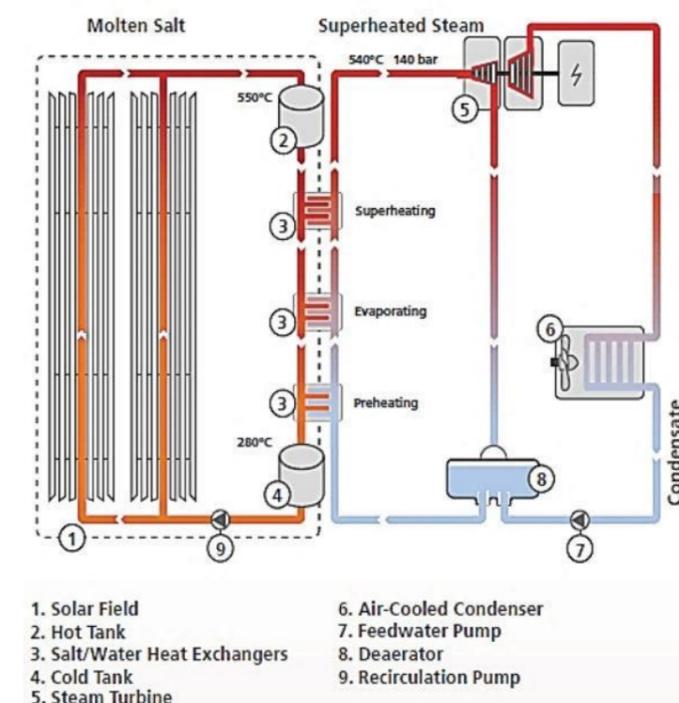


Fig. 3: Visão geral de uma planta CSP.

No campo solar, espelhos são utilizados para concentrar a irradiação solar em um elemento no qual flui alguma substância com alta capacidade de absorver e reter calor. Este fluido térmico, comumente referido pela sigla HTF (do inglês *Heat Transfer Fluid*), é aquecido e segue para ser armazenado em tanques com alta capacidade de isolamento térmico. O HTF que sai destes tanques passa por uma série de trocadores de calor com objetivo de aquecer água e gerar vapor superaquecido para alimentar o ciclo de potência. O vapor superaquecido é utilizado para mover uma turbina acoplada a um gerador, assim gerando energia elétrica.

Os equipamentos que concentram a ir-

radiação solar são chamados de coletores solares, sendo os principais tipos ilustrados na Figura 4:

- Coletor cilindro parabólico (a na Figura 4), consiste de um espelho parabólico posicionado de forma a fazer os raios solares convergirem em um tubo, no qual flui o HTF;
- Coletor linear Fresnel (b na figura 4), consiste em vários espelhos planos ou levemente parabólicos, posicionados de forma a concentrar a irradiação solar em um tubo, no qual flui o HTF;
- Coletor disco parabólico (c na figura 4), consiste em um espelho em formato de paraboloide de revolução posicionado de forma a fazer os raios solares convergirem em um disco, no qual flui o HTF;
- Torre central (d na figura 4), consiste em uma série de espelhos planos posicionados em uma grande área, de forma a concentrar a irradiação solar em uma região de uma torre central, na qual flui o HTF.

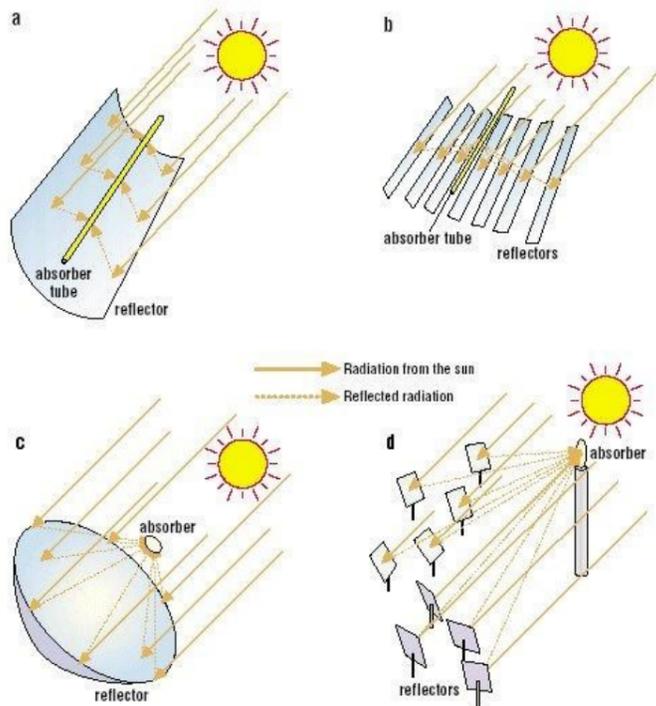


Fig. 4: Principais tipos de coletores solares. Fonte: SILVI, 2011.

Os processos com torre central possuem elevada eficiência e capacidade de geração, tendo em vista que trabalham com temperaturas elevadas (por volta de 500 °C). Já existem plantas deste tipo, as quais o excedente de energia durante o dia permite geração de energia 24 horas por dia, desde que as-

sociado a um sistema de armazenamento adequado. Apesar da alta capacidade de produção, as plantas com torre central têm custo de implementação e operação elevados devido às grandes dimensões e complexidade de operação de vários elementos, como espelhos e a própria torre, o que torna inviável a utilização deste processo quando a disponibilidade de recursos não é grande. Os processos com disco solar também possuem grandes limitações devido ao custo de construção e operação, e à complexidade elevada de seus elementos construtivos, o que limita a escala de aplicação desta solução.

Os coletores cilindro parabólicos e do tipo Fresnel possuem muitas características em comum, como a presença de um tubo absorvedor acima dos espelhos, onde é concentrada a irradiação, e a associação de coletores em série, de forma a ampliar a área de espelhos concentrando irradiação em um laço e possibilitando atingir temperaturas elevadas (entre 200 e 300 °C), como na Figura 5.



Fig. 5: Exemplo de campo solar com coletores Fresnel.

Os coletores parabólicos possuem melhor rendimento por área de abertura, mas os coletores Fresnel permitem um melhor aproveitamento da área de terreno por necessitarem de menor espaçamento entre linhas paralelas de coletores. Existem muitas pesquisas voltadas ao desenvolvimento e controle de processos com coletores parabólicos, mas, na última década, o interesse nas pesquisas com coletores Fresnel tem aumentado devido ao menor custo e complexidade de construção desse tipo de equipamento.

O coletor Fresnel como alternativa promissora ao coletor parabólico

Nos coletores parabólicos, devido à forma como estes são rotacionados para realizar o se-

guimento do sol ao longo do dia, são necessárias juntas complexas que permitam o movimento do absorvedor em cada seção de coletores, como mostrado na Figura 6. Além de apresentar um desafio de manutenção, este tipo de peça possui custo elevado, dado que deve operar com temperaturas altas enquanto se move. O espelho curvo também é um elemento que encarece muito o coletor parabólico já que têm grande dimensão e a sua produção requer fornecedores especializados.



Fig. 6: Exemplos de juntas que permitem a movimentação do absorvedor em coletores parabólicos.

Apesar de possuir mais elementos móveis para a movimentação de cada espelho para o seguimento do Sol, os coletores Fresnel requerem estruturas menos complexas, mais leves e que apresentam menos resistência ao vento quando comparados aos coletores parabólicos. O custo de fabricação reduzido e a maior disponibilidade de fornecedores de componentes possibilitam a implementação deste tipo de coletor com produção local e em regiões com menor nível de desenvolvimento industrial. A maior simplicidade da implementação também permite a incorporação deste tipo de coletor em edificações, como mostrado na Figura 7, a qual apresenta um coletor utilizado no sistema de resfriamento de ar de um edifício.

Controle de campos solares e oportunidades com coletores Fresnel

O controle de campos solares, em geral, possui objetivo de capturar a maior quantidade possível de energia, respeitando as restrições operacionais. Uma das principais restrições é o limite superior da temperatura do fluido térmico, que deve ser respeitado para manter



Fig. 7: Coletor de Fresnel no teto da escola de engenharia da Universidade de Sevilla.

a integridade dos equipamentos. Devido ao superdimensionamento proposital do campo de coletores em processos CSP, o superaquecimento é um problema muito relevante. As estruturas típicas de controle de campos termosolares comumente utilizam somente a vazão como variável manipulada, o que pode não ser suficiente para compensar superaquecimento quando a vazão está elevada. Nestes casos, existem sistemas de segurança que, caso a temperatura chegue a uma vizinhança do limite superior, desfoca completamente os coletores.

Os coletores Fresnel adicionam um grau de liberdade que pode ser explorado pelo sistema de controle: o foco dos espelhos no absorvedor pode ser modificado de forma a manipular a quantidade de energia térmica transferida para o HTF. A manipulação direta da quantidade de energia que é transmitida ao HTF permitiria uma atuação mais rápida do controle quando comparado ao controle tradicional que manipula apenas as vazões nos laços.

Desfoque em campos solares e coletores Fresnel

A incorporação do desfoque no controle de coletores foi explorada nas pesquisas de mestrado de Tiago Elias do PPGEAS, que apresentou um controlador preditivo não-linear híbrido para o controle do campo solar. Nesta proposta, o controlador realiza desfoque total de coletores individualmente, do mais a jusante ao mais a montante em um laço, de forma a desfocar o mínimo possível para evitar o

superaquecimento do HTF. Tiago também investigou a possibilidade de desfoque parcial em intervalos de 10% na estrutura do controle. Dando seguimento a esta linha de investigação, neste projeto de pesquisa foram incorporados aspectos do desfoque total e parcial das propostas anteriores em um único controlador.

Apesar de indicarem as vantagens de incorporar o desfoque no controle do campo solar, as propostas anteriores não detalham como o desfoque parcial pode ser implementado. Nesse contexto, iniciou-se uma investigação para averiguar a possibilidade de utilizar os espelhos de coletores Fresnel para implementar estes desfoques propostos. Primeiramente, foi desenvolvido um modelo óptico geral e simplificado de um coletor Fresnel, de forma a conhecer a contribuição energética de cada espelho em um coletor. O modelo consiste de várias equações trigonométricas para calcular elementos, como sombreamento entre espelhos, lugar onde os feixes refletidos interceptam o absorvedor, além de perdas por inclinação dos raios refletidos ou sombra do absorvedor nos espelhos.

Para validar o modelo, foi utilizado o indicador do ângulo de incidência (IAM, do inglês *Incidence Angle Modifier*), que representa a relação entre o fluxo de energia no absorvedor com o sol exatamente acima do absorvedor em relação ao sol em qualquer outra angulação. Os valores para comparação foram obtidos da folha de dados do coletor de referência e de uma simulação feita no software SolTrace. Os resultados da validação estão apresentados na Figura 8.

Com um modelo do coletor pronto, a etapa seguinte foi investigar o seguimento do sol e se era possível propor um algoritmo que melhorasse o desempenho do coletor. A comparação com a solução mais simples, que consiste em fazer os raios que incidem no centro de cada espelho incidir no centro do absorvedor, é ilustrada na Figura 9.

Após avaliar algoritmos que maximizam o fluxo de energia no absorvedor ou visam diminuir assimetrias na distribuição da incidência no absorvedor, os máximos ganhos

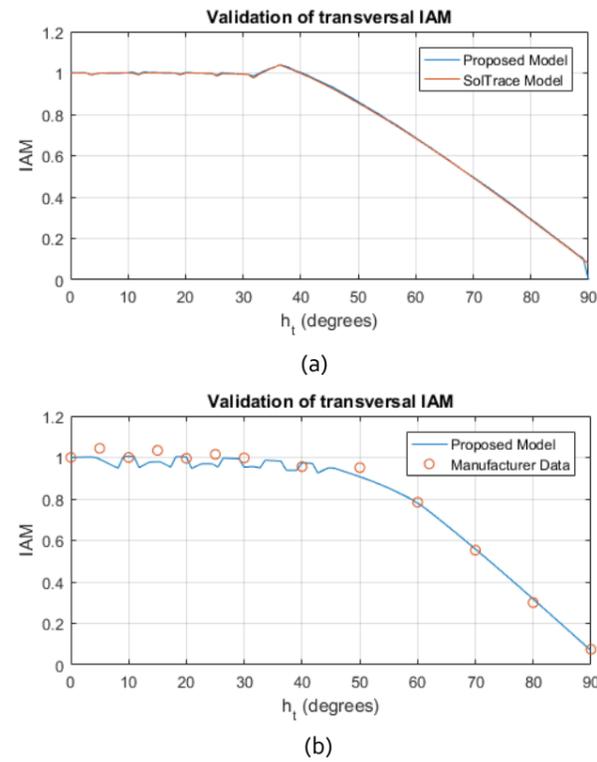


Fig. 8: Validação do modelo óptico com (a) dados do simulador SolTrace e (b) dados do fabricante do coletor.

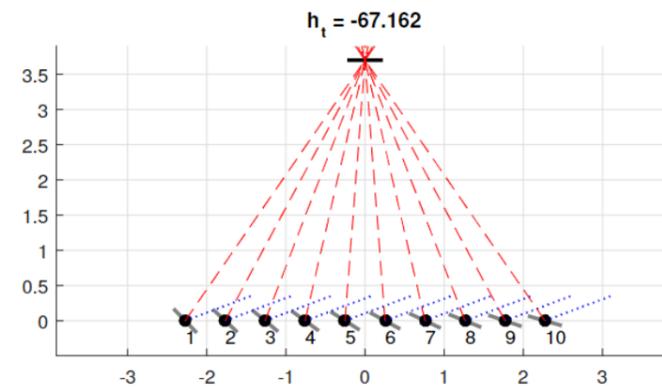


Fig. 9: Ilustração do seguimento do Sol em um coletor Fresnel. Linhas pontilhadas representam os raios incidentes nos espelhos e linhas tracejadas os raios refletidos.

obtidos foram menores que 1% quando comparados com a solução simples. Isso ocorre pois em um coletor bem projetado, o fator que mais impacta negativamente o seu desempenho é a sombra do absorvedor nos espelhos, que não pode ser alterada pela manipulação dos espelhos.

Por fim, a pesquisa levou a investigar formas de implementar os desfoques propostos pelos controladores preditivos dos trabalhos apresentados no início desta seção. A primeira iniciativa consistiu em incorporar o modelo óptico do coletor no controlador preditivo, mas as não-linearidades inerentes ao modelo

elevaram consideravelmente o custo computacional da solução, inviabilizando o cálculo em tempo real.

Com os resultados insatisfatórios obtidos na primeira abordagem, foi proposto um desacoplamento do modelo óptico do controlador preditivo. Nesta nova estrutura, as ações de desfoque propostas pelos controladores alimentariam uma estrutura em nível inferior que calcula o posicionamento dos espelhos para implementar o desfoque. Esta proposta está ilustrada na Figura 10.

Para o cálculo das posições dos espelhos, foi proposta inicialmente uma estrutura com desfoque total individual de cada espelho. Nesta proposta, o algoritmo calcula a

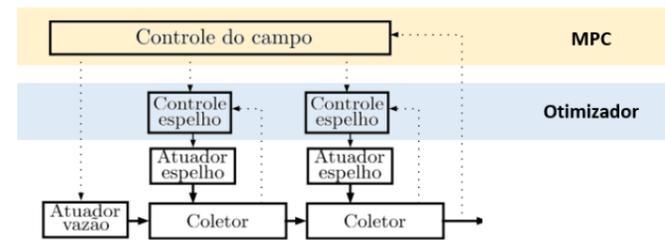


Fig. 10: Estrutura de controle proposta.

combinação de espelhos que resulta no valor de desfoque mais próximo ao proposto pelo controlador mestre. Os resultados, exibidos na Figura 11, mostram que os piores desvios obtidos foram menores que 5%. Também é notável que para uma angulação do Sol que propicia maior irradiação (valores de h_t mais próximos de zero), o erro não ultrapassa 1%. Este resultado é promissor e indica que é possível implementar de forma relativamente simples o desfoque em coletores Fresnel.

Este é um trabalho em andamento. Os resultados apresentados até agora foram submetidos para uma revista especializada e aguardam revisão. Os próximos passos deste trabalho são: Investigar a implementação de um desfoque verdadeiramente contínuo na estrutura que calcula as posições dos espelhos e incorporar essa estrutura em simulações com controladores preditivos para avaliar o desempenho geral da solução proposta.

Considerações finais

Apesar da geração elétrica termossolar ser uma realidade, ainda há desafios a serem vencidos por investigação. Os coletores Fres-

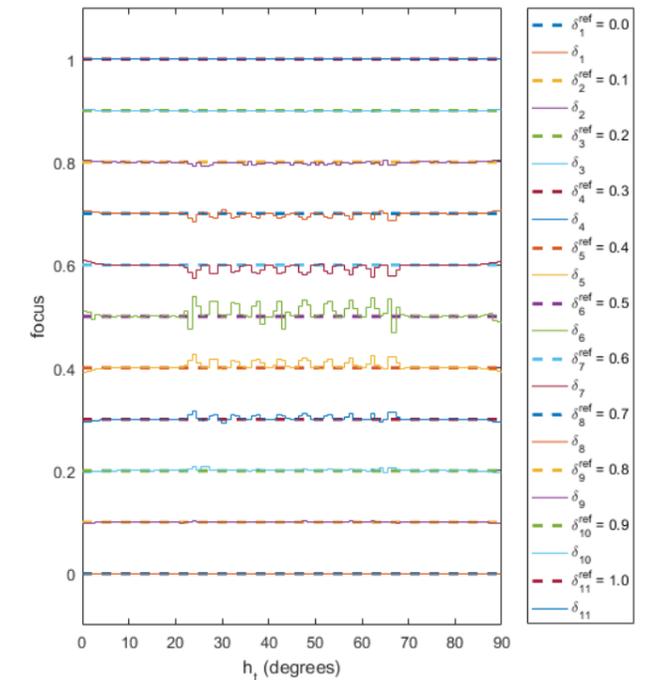


Fig. 11: Desempenho da estrutura que determina a posição dos espelhos para várias angulações possíveis do Sol. Linhas pontilhadas representam um nível de desfoque proposto e linhas contínuas apresentam o nível de foco possível com a combinação de espelhos.

nel possuem potencial para viabilizar economicamente muitas aplicações e trabalhos vem sendo desenvolvidos a fim de explorar as novas possibilidades deste tipo de coletor em estruturas de controle de campos solares. As oportunidades de pesquisa com este tipo de coletor termossolar são diversas e, se concretizadas, certamente contribuirão para uma adoção maior de fontes de energia renováveis e de reduzido impacto no meio ambiente.

Referências

- DE ARAUJO ELIAS, T. et al. Optimal solar collectors defocusing based on maximum temperature. 2018 9th International Renewable Energy Congress, IREC 2018, p. 1-5, 2018.
- DE ARAÚJO ELIAS, T.; MENDES, P. R. DA C.; NORMEY-RICO, J. E. Hybrid predictive controller for overheating prevention of solar collectors. Renewable Energy, v. 136, p. 535-547, 2019.
- SILVA, A. et al. Overheating prevention in solar collectors using a hybrid predictive controller. Solar World Congress, 2019, Chile.
- SILVI, C. Italian contribution to CSP with flat or almost flat reflectors. 30th ISES Biennial Solar World Congress 2011, SWC 2011, v. 2, n. November, p. 952-962, 2011.

Autor: Prof. Rodolfo C. C. Flesch

Desde 2016, o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (PPGEAS) desenvolve atividades em conjunto com a Fuzhou University, na China, e com a University of Michigan-Dearborn, nos Estados Unidos, nas linhas de controle e instrumentação de redes inteligentes (ou *smart grids*, como são conhecidas em inglês) para suportar a inclusão de fontes de energia renovável.

Os trabalhos de instrumentação focam no desenvolvimento de transdutores para aplicações especiais, emprego de modelos de aprendizado de máquina para criar sensores virtuais de grandezas que não podem ser medidas diretamente e uso de técnicas de processamento de sinais para caracterizar oscilações de baixa frequência na rede elétrica. Com suporte de instituições parceiras, como a State Grid Corporation of China (responsável pela maior parte da rede elétrica da China) e a Pearl Electric Co. (fornecedora de equipamentos para o setor elétrico para mais de 40 países), há acesso a dados reais de campo e disponibilidade de equipamentos que emulam o comportamento da rede elétrica.

Os trabalhos na área de controle se concentram principalmente em técnicas de controle avançado para conversores, com foco em sistemas de geração conectados à rede elétrica. Como os conversores operam em frequências elevadas, as técnicas de controle precisam ser computacionalmente eficientes, de modo a atingirem períodos de amostragem compatíveis com chaveamentos da ordem de 5 kHz. Muitos dos códigos são implementados em arranjos de portas programáveis em campo (FPGAs, do inglês *Field Programmable Gate Ar-*

rays) ou processadores digitais de sinais (DSPs, do inglês *Digital Signal Processors*) para avaliação prática. Para avaliação, a universidade chinesa conta com infraestrutura de laboratório, como a do exemplo apresentado na Figura 1, que considera conversores multinível para controle de um motor de indução e da geração de um gerador síncrono a ímãs permanentes. Os controladores podem ser programados diretamente em FPGAs e DSPs, ou podem ser enviados para um computador que executa um sistema operacional de tempo real (Target PC) e permite programação em linguagens de mais alto nível. A planta pode ser empregada para avaliação de controladores tanto para conversão de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) quanto o contrário. Um exemplo típico de aplicação é o uso do motor de indução para emular o comportamento que o vento teria nas pás de uma turbina eólica, acoplada a um gerador, dessa forma permitindo a avaliação de diferentes estratégias de controle para o conversor que faz a integração desse gerador com a rede elétrica.

A parceria já resultou na orientação

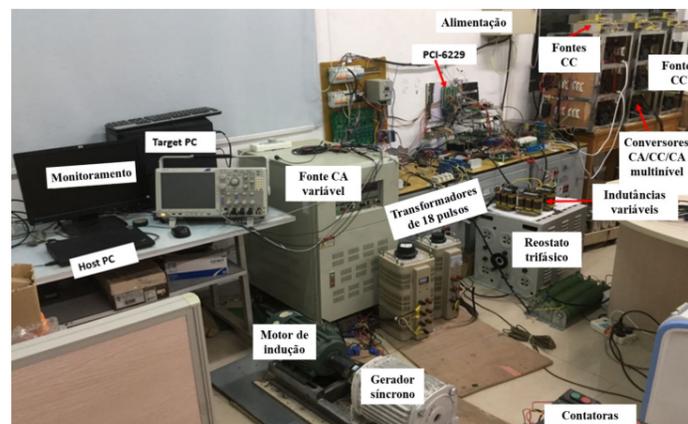


Fig. 1: Infraestrutura laboratorial parceira para avaliação experimental de controladores avançados para conversores eletrônicos (Fuzhou University).

conjunta de seis trabalhos de pós-graduação e na publicação de mais de vinte artigos científicos. Um exemplo desses trabalhos consistiu no desenvolvimento de técnicas de controle preditivo para conversores resilientes a falhas e capazes de operar em condições distantes da nominal para integração de sistemas de geração fotovoltaicos à rede elétrica. Uma representação esquemática do contexto de aplicação do controlador desenvolvido é apresentada na Figura 2. No esquema, é possível observar que há vários fatores que afetam a conversão em um sistema de geração fotovoltaico, tais como variação da irradiação solar ao longo do dia, o sombreamento parcial do campo de geração e o acúmulo de poeira e outras sujeiras sobre os coletores solares. Esses fatores podem aparecer como variação nos parâmetros nominais do modelo e em desbalanceamento dentro do conversor, representado na figura como a existência de tensões desiguais nos barramentos de corrente contínua. Além disso, podem ocorrer falhas tanto em coletores quanto em alguns dos componentes dos conversores.

Em um cenário real de geração fotovoltaica, como o descrito no parágrafo anterior, um controlador preditivo tradicional, com modelo fixo, não é capaz de manter um padrão aceitável de chaveamento nos conversores. Isso acontece porque os controladores aplicados nesse tipo de processo precisam de respostas bastante rápidas, o que faz com que a sintonia seja pouco robusta a variações paramétricas e a mudanças nas condições de operação. A ideia geral do trabalho é empregar uma abordagem de controle conhecida como controle preditivo com conjunto finito de ações de controle e integrar informações pas-

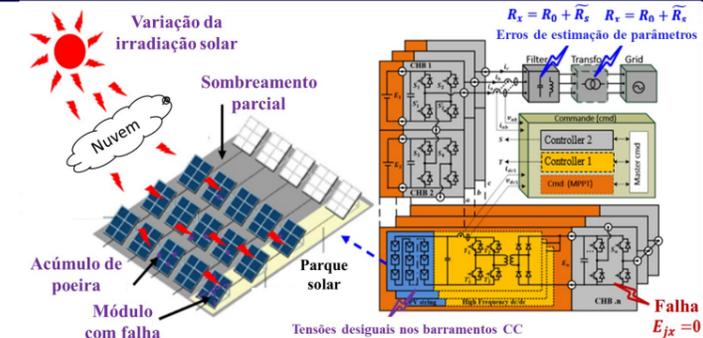


Fig. 2: Ilustração de problemas que aparecem no controle de conversores para integração de parques fotovoltaicos com a rede elétrica.

sadas da corrente elétrica medida no processo para atualizar o modelo de previsão, de modo que ele represente de forma mais fiel cada um dos possíveis estados do sistema.

Nesse mesmo contexto de colaboração, há várias outras aplicações de controle sendo estudadas para suportar a integração de fontes de energia renovável e aumentar a eficiência energética de sistemas, tais como o desenvolvimento de controladores para conversores que permitam a regeneração da energia de frenagem de trens e metrô elétricos, o desenvolvimento de técnicas de modulação mais eficientes para aplicação em conversores multinível que operam com controladores convencionais e o desenvolvimento de técnicas de controle preditivo multiobjetivo sem ponderações na função custo para aplicações em conversores de alta potência.

Controle Ótimo de Plantas de Energia Solar Concentrada Operando com Sistema de Armazenamento Térmico

Autores: Paulo H. Biazetto (doutorando PPGEAS), Prof. Gustavo A. de Andrade e Prof. Julio E. Normey-Rico.

Esta pesquisa foi desenvolvida no contexto do convênio “Aprimoramento e validação de plataforma de simulação de plantas heliotérmicas de concentração linear com estudos de inovação tecnológica”, entre a Petrobras e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O projeto contou com diversos bolsistas de graduação e pós-graduação da Universidade. Como resultados finais, foram desenvolvidos conhecimentos para projeto, operação e otimização de plantas heliotérmicas, com foco no aprimoramento e validação de plataforma de simulação de plantas com sistemas de concentração linear, e desenvolvimento de estratégias de controle adequadas às condições solares brasileiras.

Neste artigo será apresentada uma metodologia de controle ótimo desenvolvida no contexto do convênio para maximizar a receita da energia produzida em uma planta de energia solar concentrada baseada em coletores Fresnel. Os resultados desta pesquisa compõem a dissertação de mestrado do primeiro autor deste artigo no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da UFSC. Mais detalhes sobre a metodologia podem ser visualizados em BIAZETTO, 2021.

Plantas de Energia Solar Concentrada

Plantas de energia solar concentrada são consideradas uma alternativa promissora para a geração de energia renovável devido a sua eficiência e baixos custos de instalação. Estes sistemas geram calor utilizando espelhos que concentram uma grande área de luz solar em tubos receptores que contêm um fluido de transferência térmica (HTF - do inglês *heat transfer fluid*).

A energia elétrica é produzida quando o calor gerado na planta é utilizado em uma máquina térmica (geralmente uma turbina a vapor) conectada a um gerador elétrico.

Em geral, há quatro tipos comerciais de plantas de energia solar concentrada para geração de eletricidade: coletores cilindro-parabólicos, coletores lineares Fresnel, heliostatos com receptor central, e pratos parabólicos. Dentre estas opções, a tecnologia Fresnel tem se mostrado mais barata e com melhor aproveitamento de terra. Além disso, ela é capaz de atender aplicações industriais de baixa e média potência. Um diagrama esquemático de uma planta solar baseada na tecnologia de coletores Fresnel é apresentado na Figura 1.

Basicamente, estas plantas consistem de um campo de coletores solares, um ciclo de potência e um sistema de armazenamento térmico, permitindo que a planta opere em horários escalonados ao invés de somente em modo de despacho da energia solar atual. Em alguns casos há um sistema auxiliar acionado por combustível fóssil. Esta hibridização com combustíveis fósseis é geralmente realizada com o auxílio de um aquecedor a óleo, capaz de manter a temperatura do fluido térmico acima do valor mínimo de operação em períodos que não há radiação solar.

Plantas solares de grande porte já são uma realidade em países desenvolvidos, como por exemplo a Espanha e os Estados Unidos, capazes de gerar mais de 300 MW. Apesar do Brasil ainda não possuir nenhum sistema deste tipo em operação, o investimento em energia solar no país aumentou muito nos últimos anos, dado que diversas regiões possuem condições favoráveis para explorar esta fonte de energia. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020), a quota de energia solar em energia elétrica total produzida em 2024 será de mais de 4%. Além disso, a perspectiva para os próximos anos é que as

fontes de energia renovável aumentarão a sua contribuição total na matriz de energia elétrica passando a representar 84% do total.

Descrição do Sistema e Problema de Controle

O diagrama esquemático da planta solar térmica estudada neste trabalho é apresentado na Figura 1. Conforme já mencionado na seção anterior, este sistema é composto por um campo de coletores solares, um ciclo de potência e um sistema de armazenamento térmico. Os coletores são distribuídos e organizados em linhas formando uma estrutura de laços em paralelo. O campo de coletores é a principal fonte de energia do sistema para aumentar a temperatura do HTF, de modo a cobrir a demanda de calor do bloco de potência. A conversão de energia radiante para energia térmica ocorre através da reflexão da luz solar nos espelhos para o tubo absorvedor, na qual circula o HTF.

Os tanques têm como objetivo armazenar a energia do HTF e desacoplar o campo de coletores do bloco de potência. O tanque de armazenamento de fluido quente armazena o fluido proveniente do campo solar, en-

quanto que o tanque de armazenamento de fluido frio armazena o fluido durante o processo de inicialização da planta, após a geração de energia e no período noturno. Como pode ser visto na Figura 1, os tanques são posicionados em série com o campo de coletores solares, entretanto, uma válvula é usada para alterar os modos de operação da planta.

Modos de Operação da Planta

A planta solar possui diversas restrições que devem ser consideradas durante sua operação. Estas restrições podem ser traduzidas nos seguintes modos de operação (veja a Figura 2), os quais são definidos comutando a válvula localizada no final do campo solar:

Partida: O fluido de transferência térmica circula entre o tanque de armazenamento de fluido frio e o campo de coletores solares impulsionado pela bomba centrífuga. Este modo de operação ocorre apenas durante a fase inicial do dia, depois do amanhecer, e permanece até que a temperatura de saída do campo do coletor solar atinja o valor mínimo de temperatura para produção.

Nominal: Assim que a temperatura de saída do campo solar atingir o valor de tem-

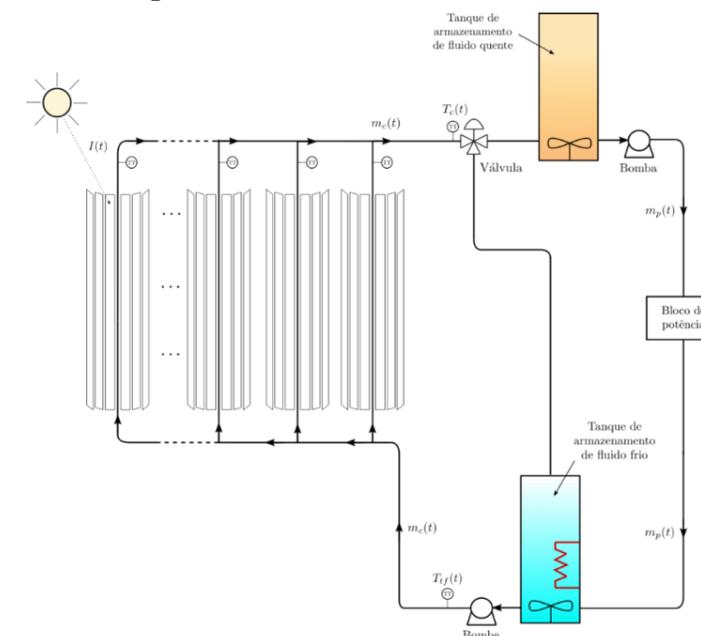


Fig. 1: Diagrama esquemático de uma planta solar térmica baseada na tecnologia de coletores Fresnel.

peratura de produção, o modo de operação nominal é acionado. Neste modo de operação, a temperatura de saída do campo solar é regulada em seu valor nominal. A válvula localizada na saída do campo comuta e o fluido de transferência térmica é direcionado para o tanque de armazenamento de fluido quente e que, por sua vez, alimentará o bloco de potência. Após sua utilização no bloco de potência, o fluido retorna para o tanque de fluido frio e é bombeado para o campo de coletores solares para reiniciar o ciclo.

Desligamento: Durante a fase final do dia (quando não há mais irradiação solar), a válvula localizada na saída do campo comuta novamente e o fluido que sai do campo é direcionado para o tanque frio. O despacho de fluido do tanque quente para o bloco de potência perdura até que este tanque esvazie.

Noturno e anti-congelamento: neste modo de operação visa-se manter os limites de temperatura do fluido dentro de uma faixa aceitável e segura, condicionando seu escoamento nas tubulações. Uma resistência elétrica no tanque frio é utilizada para adicionar o calor suficiente para manter o fluido térmico numa temperatura mínima.

Problema de Controle Proposto

Como a unidade de armazenamento desacopla completamente o bloco de potência do campo solar, o problema de controle da planta pode ser dividido em dois subproblemas: (i) o problema de controle do campo de coletores solares; e (ii) o despacho do fluido do tanque de armazenamento de fluido quente para o bloco de potência.

O objetivo de controle do campo solar é manter a temperatura de saída do fluido térmico em um valor de referência desejado. Tal objetivo pode ser alcançado manipulando a vazão mássica do campo solar por meio de uma bomba centrífuga. As principais perturbações são as mudanças na temperatura de entrada do fluido de transferência térmica, variações na temperatura ambiente, mudanças no coeficiente óptico dos coletores - decorrentes da posição solar e da reflexão nos espelhos - e mudanças na radiação solar devido ao

ciclo diário ou passagem nuvens. É importante ressaltar que o controlador deve lidar com a potência máxima que pode ser absorvida pelo receptor desfocando parcialmente os espelhos, para que a energia térmica induzida pela radiação solar não degrade o fluido de transferência térmica.

No problema de controle (ii), visa-se maximizar a receita diária da venda de eletricidade por meio da manipulação da vazão mássica de saída do tanque de armazenamento de fluido quente. Para garantir uma operação viável, o sistema de controle deve evitar a operação do bloco de potência abaixo de uma carga mínima, mudanças abruptas da vazão mássica, bem como reinicialização repetitiva do bloco de potência no mesmo dia. Este controlador também deve garantir que o fluido de transferência térmica no sistema de armazenamento de fluido frio permaneça próximo a um valor de referência durante a noite para garantir a fluidez do fluido de transferência térmica dentro da tubulação. A fonte de calor para esta operação é obtida através de uma resistência elétrica localizada neste tanque.

Metodologia de Controle Proposta

O sistema de controle proposto para esta planta foi baseado na teoria de controle ótimo. Controladores ótimos determinam os sinais de controle, de modo que a planta satisfaça as restrições e, ao mesmo tempo, minimize um critério de desempenho desejado. Este tipo de controlador é bastante apropriado para sistemas multivariáveis, onde as medidas tradicionais de desempenho, como tempo de acomodação, pico da resposta ao degrau, margem de fase e de ganho, etc., podem ser inadequadas para descrever o comportamento desejado em malha fechada.

O sistema de controle foi projetado de forma descentralizada: um controlador ótimo que visa obter a trajetória ótima dos estados do campo de coletores solares, minimizando uma função de custo associada ao rastreamento de referência de temperatura; e outro para calcular a política de controle ótimo para o armazenamento/despacho dos tanques térmicos, de acordo com o perfil de tarifa de

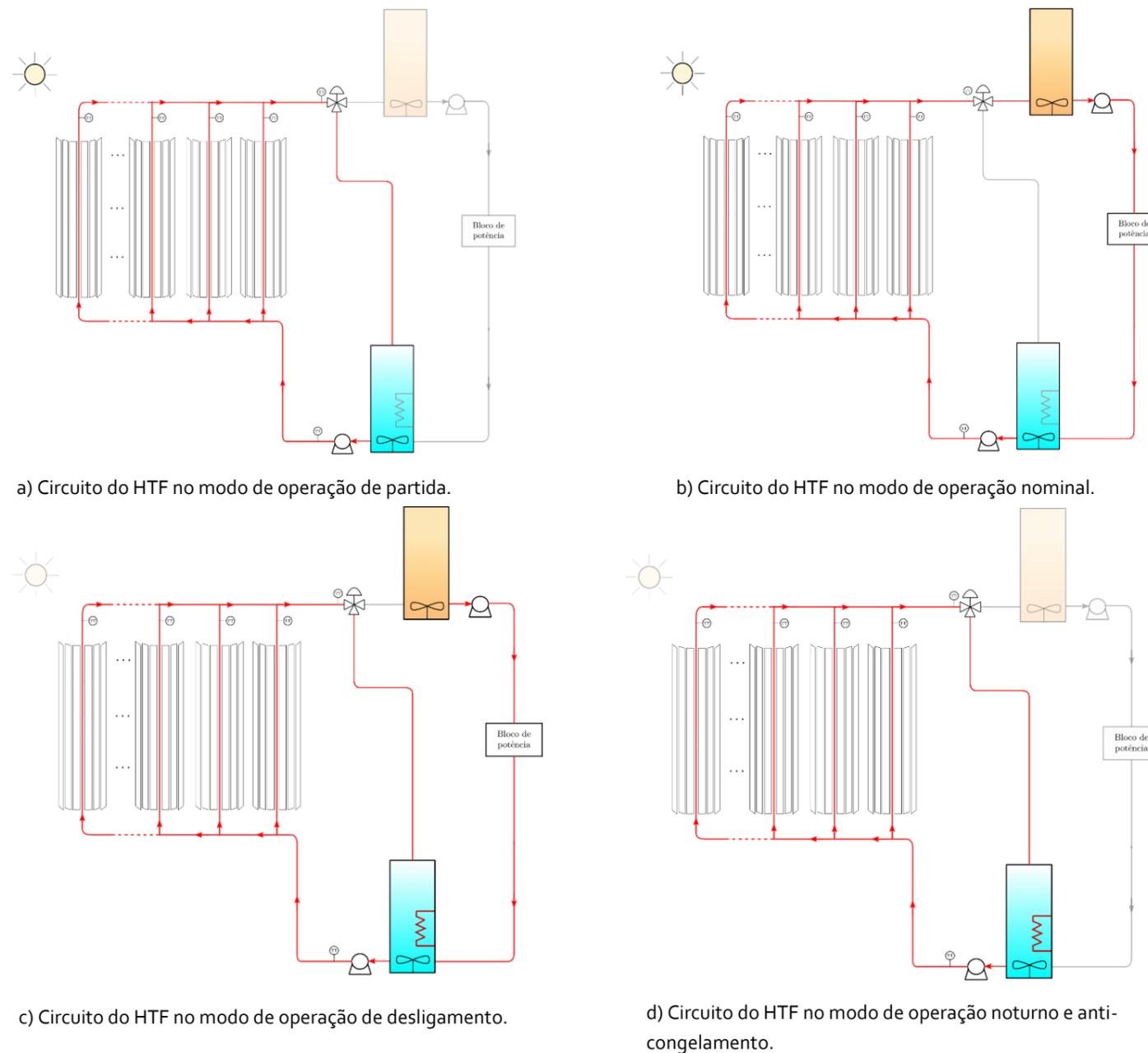


Fig. 2: Diagramas esquemáticos dos modos de operação da planta solar.

energia. Além disso, as variações das ações de controle são penalizadas e o modo de operação da planta é considerado como uma variável de decisão do problema de controle. Mais detalhes sobre a metodologia de controle e sua implementação prática podem ser vistos em BIAZETTO, 2021.

Resultados de Simulação

Os testes numéricos foram conduzidos considerando um simulador não linear da planta e dados meteorológicos correspondentes à localização geográfica 22°41'22,65"S 45°00'22,28"W, disponíveis em INPE (2019). Os valores das tarifas energéticas foram obtidos da distribuidora de energia ENEL, do Rio de Ja-

neiro - Brasil. Basicamente, o perfil da tarifa é constante por partes e assume três valores distintos ao longo do dia, a saber, tarifa branca fora de pico (0,550 R\$/Kwh), tarifa branca intermediária (0,831 R\$/Kwh) e tarifa branca de pico (1,280 R\$/Kwh). Em particular, das 16h00 às 18h00 e das 21h00 às 22h00, o perfil assume a tarifa branca intermediária, enquanto que a tarifa branca de pico cobre o intervalo das 18h00 às 21h00. Para o resto do dia, o perfil assume a tarifa branca fora do pico. Esses valores entraram em vigor em 15/03/2020 por meio da resolução 2666/2020, conforme pode ser verificado em ANEEL (2020).

As simulações foram codificadas em MATLAB e o pacote CasADi (ANDERSSON

et al. 2019) foi usado para resolver numericamente o problema de controle ótimo. Especificamente, o problema de controle ótimo foi discretizado utilizando uma abordagem direta de modo que o problema original fosse transformado em um problema de programação não linear, o qual pode ser resolvido de maneira eficiente e rápida.

A Figura 3 mostra a evolução temporal das principais variáveis do campo de coletores solares operando com a estratégia de controle proposta. Este cenário numérico considera a planta operando durante seis dias com perfis de radiação de dias limpos e nublados (veja o segundo gráfico da Figura 3) para impor uma ampla faixa de condições de operação. Como pode ser visto no primeiro gráfico da Figura 3, o sistema de controle foi capaz de garantir o seguimento de referência de temperatura ao longo do período claro dos dias simulados. Curiosamente, durante os primeiros quatro dias o controlador manteve a temperatura de saída do campo com foco total dos espelhos (veja o terceiro gráfico da Figura 3). Nos últimos dois dias, o desfoque foi necessário devido aos altos valores de radiação e restrições na vazão mássica do campo solar. Note que, durante o período noturno, o sistema não é capaz de rastrear a referência de temperatura, já que a radiação solar é nula e a planta possui somente perdas térmicas neste período.

Os modos de operação da planta ao longo da simulação são apresentados no gráfico inferior da Figura 3. Por questões de legibilidade, os modos de operação foram definidos como: 0 - noturno e anti-congelamento; 1 - partida; 2- nominal; e 3 - desligamento.

A evolução temporal das variáveis associadas ao sistema de armazenamento térmico é apresentada na Figura 4. O nível e a temperatura dos tanques de armazenamento de fluido quente e frio são mostrados no primeiro e segundo gráfico da Figura 4, respectivamente. Note que seus níveis permanecem constantes ao longo do modo de operação noturno e o calor induzido pela resistência elétrica (gráfico inferior da Figura 4) ajusta a temperatura do fluido para mantê-lo no pon-

to de operação.

O controlador ótimo sempre despacha o fluido do tanque de armazenamento de fluido quente para o bloco de potência durante o intervalo de tempo com melhores preços tarifários (veja o terceiro gráfico da Figura 4). Além disso, a carga mínima de despacho para o bloco de potência é sempre satisfeita, ao mesmo tempo que não apresenta a reiniciali-

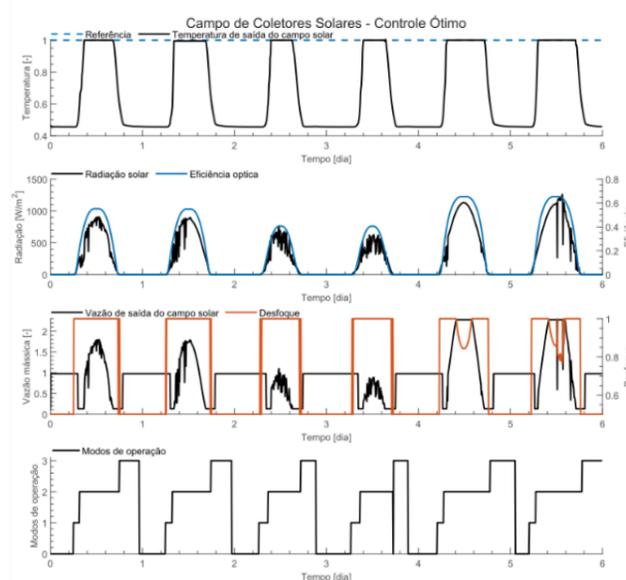


Fig. 3: Resultados de simulação do campo solar com a estratégia de controle ótimo.

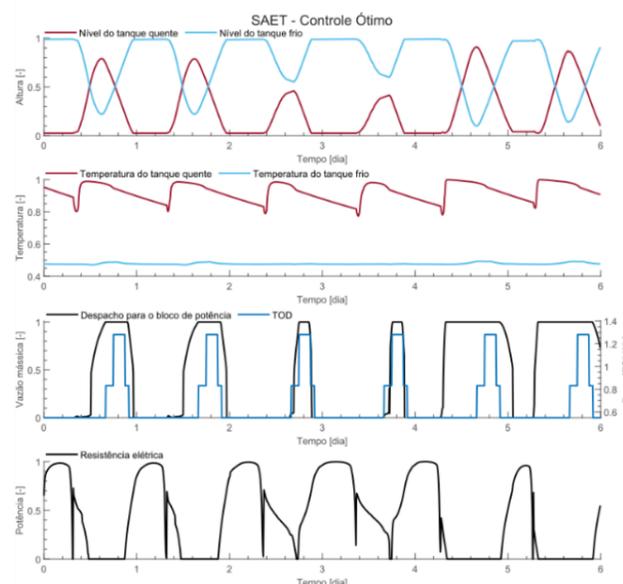


Fig. 4: Resultados de simulação do sistema de armazenamento térmico com a estratégia de controle ótimo.

ção repetitiva no mesmo dia.

A modo de exemplo, a estratégia de controle ótimo foi simulada por um período de um ano com dados meteorológicos reais. A curva de nível do fluido despachado para o

bloco de potência é apresentada na Figura 5. A cor azul escura refere-se à vazão mássica nula e a cor amarela à vazão mássica máxima. Note que durante os meses com radiação solar abundante, tais como janeiro e dezembro, o controlador antecipa o despacho do fluido para o bloco de potência para que o tanque de armazenamento não sature, enquanto garante a maximização da receita do sistema. Estes resultados foram comparados com uma estratégia de controle clássica para plantas solares, quando ganhos de 13.63% na receita anual foram obtidos com a metodologia de controle ótimo proposta.

Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma estratégia de controle ótimo para uma planta de geração de energia elétrica a partir de energia solar térmica concentrada baseada na tecnologia de coletores Fresnel, operando com dados meteorológicos e tarifas de energia elétrica do Brasil. Os resultados da simulação mostraram que esta metodologia obteve receita 13.63% maior do que uma estratégia clássica usada em plantas reais. No entanto, é importante destacar que foi considerado um cenário numérico ideal, isto é, o conhecimento da radiação solar futura e a inexistência de

erros de modelagem. Neste contexto, o desempenho obtido representa um limite teórico da operação do sistema e indica que ganhos expressivos podem ser conseguidos, mesmo sendo menores que o alcançado nestas simulações.

Referências Bibliográficas

- BIAZETTO, P. H. F. Development of an optimal control strategy for temperature regulation and thermal storage operation of a solar power plant. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://tede.ufsc.br/teses/PEAS0377-D.pdf>
- ANDERSSON, Joel A E; GILLIS, Joris; HORN, Greg; RAWLINGS, James B; DIEHL, Moritz. CasADi - A software framework for nonlinear optimization and optimal control. *Mathematical Programming Computation*, v. 11, n. 1, p. 1–36, 2019.
- ANEEL. Resolução homologatória nº 2666, de 10 de março de 2020. 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20202666ti.pdf>. Acessado em: 15 de abril de 2021.
- INPE. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. 2019. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/florianopolis.html>. Acessado em: 01 de março de 2019.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Plano decenal de expansão de energia 2030. 2020. Disponível em: [EPE – publicações](https://www.ene.gov.br/pt-br/publicacoes). Acessado em : 18 de maio de 2021.

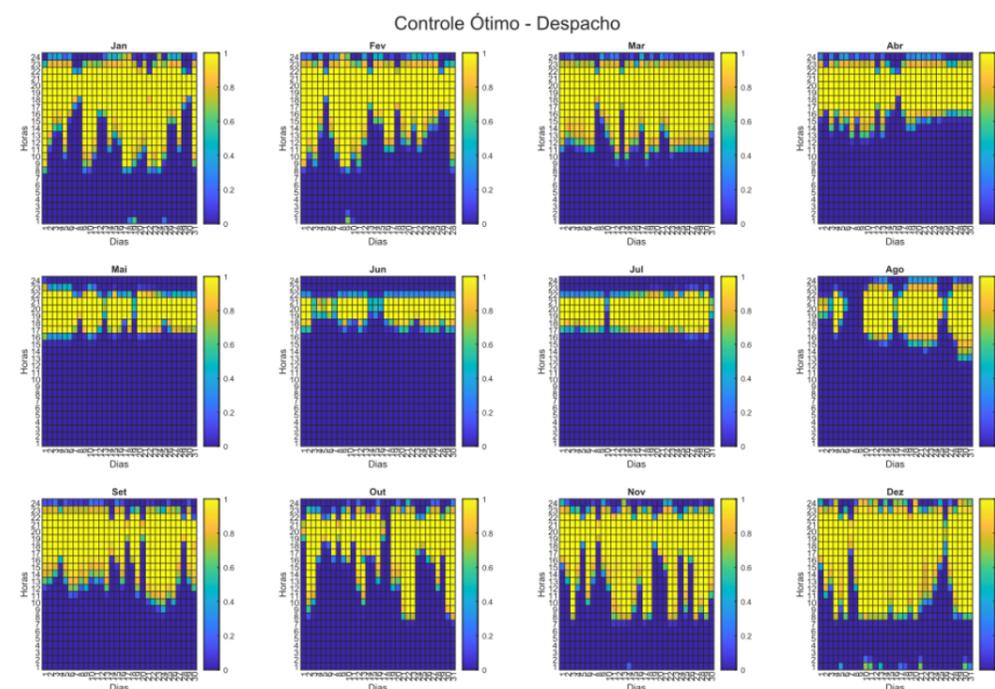


Fig. 5: Curvas de nível do fluido despachado para o bloco de potência utilizando a estratégia de controle ótimo.

Um Paradigma para o Futuro da Geração de Energia Sustentável no Brasil

Autores: Marcelo M. Morato (doutorando PPGEAS) e Prof. Julio E. Normey-Rico.

Esta pesquisa teve como objetivo propor e analisar uma estrutura híbrida para a geração de energia limpa, de forma sustentável, a ser integrada a usinas de Cana-de-Açúcar, considerando o cenário energético do Brasil. O trabalho realizado é de grande relevância devido à importância nacional da indústria da Cana-de-Açúcar, atividade chave para a produção de açúcar e etanol. Uma estrutura eficiente de microrede foi proposta como uma nova abordagem para geração híbrida de energia, integrando a reutilização dos resíduos da Cana-de-Açúcar (como a biomassa e o biogás) combinada com o uso de fontes renováveis externas, tais como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, almejando reduzir impactos ambientais. A pesquisa foi realizada com apoio do CNPq, e dela participaram vários estudantes de pós-graduação do PPGEAS, o coordenador Prof. Julio E. Normey-Rico e o Prof. Carlos Bordons da Universidade de Sevilla.

A modelagem do sistema proposto seguiu a metodologia dos *Energy Hubs*, que permite a integração de diferentes transportadores, geradores e acumuladores de energia em um mesmo modelo. Em sequência, uma abordagem para a operação ótima é apresentada, seguindo a metodologia do Controle Preditivo baseado em Modelo. Os principais resultados deste trabalho se resumem em: a) resultados de simulação que provam a operação satisfatória da microrede proposta, sua flexibilidade para cumprir diferentes cenários de demanda energética, como também os ganhos práticos em termos econômicos e de sustentabilidade; b) uma discussão e análise de custo e viabilidade econômica completa, através de

cálculos de *payback*, apontando para a possibilidade de implementação em um futuro próximo.

Energias renováveis e o cenário do Brasil

O uso e a geração de energia de maneiras eficientes são peças chave para um futuro mais sustentável e ecologicamente amigável. Muito é discutido sobre o uso de fontes renováveis, mas é importante ressaltar que, mesmo que estas sejam muito atrativas, elas são intermitentes, difíceis de prever e altamente dependentes das condições climáticas da região onde a planta energética é instalada.

De forma geral, o maior problema relacionado a sistemas de energia renovável é a falta de fiabilidade e a qualidade inconstante (sujeita a flutuações imprevisíveis) da energia produzida. Uma solução prática para tratar este problema é considerar a inclusão de sistemas intermediários de armazenamento de energia, como baterias, supercapacitores e outros, que permitem armazenar o excedente de energia produzida em momentos de baixa demanda e utilizá-la em momentos onde a demanda supera a oferta. Para que este tipo de sistema opere de forma satisfatória, é necessário um sistema de controle complexo de todo o conjunto, operando em várias camadas, sendo a de mais alto nível um sistema de gerenciamento de energia, que é responsável por decidir como e quando produzir, armazenar ou vender/comprar energia.

Este trabalho estudou o caso da geração distribuída de energia, no qual um con-

junto de plantas de energia localizadas perto do usuário final, que podem ser integradas à rede elétrica ou operadas de forma autônoma, atendem uma certa demanda da região. Estes sistemas são denominados na literatura como microrredes.

O Brasil tem uma matriz energética imensamente diversificada, dada a grande participação das energias hidrelétrica, biomassa, solar e eólica. A energia solar, por exemplo, pode ser considerada como uma das possíveis fontes de energia que podem aumentar a quantidade de geração renovável, pois o país tem um grande potencial solar em várias regiões onde ainda esta energia não vem sendo usada. O investimento neste setor tem aumentado nos últimos anos e já apresenta custos competitivos, o que pode permitir uma mudança da matriz energética.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. A indústria da Cana-de-açúcar tem grande importância para este estudo, pois o tratamento da cana bruta tem uma grande quantidade de resíduos orgânicos que podem ser tratados como bio-fontes de energia. Existem três principais resíduos que podem ser usados para geração de energia: o bagaço, o palhiço (palha) e a vinhaça.

O bagaço é o principal resíduo da cana. Ele é muito poluente se for descartado sem o devido tratamento e, por isso, ele é comumente usado como combustível de queima para caldeiras. O vapor produzido nestas caldeiras é usado nos processos da própria usina e também em turbinas a vapor que acionam geradores elétricos. A energia elétrica produzida é então vendida e/ou usada na própria fábrica.

A palha da cana é composta de folhas secas, verdes e pela ponteira da cana-de-açúcar. Este resíduo é responsável por aproximadamente um terço da fonte primária de energia da cana. Porém, ainda não é explorado em toda sua plenitude. No Brasil, é muito comum a palha ser deixada no chão dos campos ou ser queimada no período de pré-colheita.

Finalmente, a vinhaça é um resíduo da produção de etanol pela destilação do caldo da cana-de-açúcar fermentado (garapa). A vinhaça pode ser transformada em biogás, considerando um processo de digestão anaeróbica. Este biogás tem um potencial energético interessante e seu uso permite reduzir as emissões de CO_2 .

Em termos de quantificação destes resíduos, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada são obtidos aproximadamente 730 kg de garapa e mais de 250 kg de bagaço. Na produção de etanol, para cada litro de combustível produzido, 12 litros de vinhaça podem ser obtidos das sobras. Assim, esta indústria tem um potencial muito grande para uso de algumas (ou todas) essas fontes como possíveis biocombustíveis.

Integração de energias renováveis

O problema investigado neste trabalho foi: **Como integrar o uso de fontes renováveis a matriz energética brasileira de forma factível e rentável?**

Com base na tecnologia presente na maioria das indústrias de cana-de-açúcar, no Brasil, se propôs uma nova solução de gera-

ção híbrida, considerando a reutilização dos resíduos da cana em conjunto com uso de fontes renováveis externas, como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas. O sistema proposto e seu sistema de controle foram então projetados visando criar uma microrrede renovável, que permitisse atenuar as emissões e o impacto ambiental, mas, ao mesmo tempo, desse confiabilidade ao sistema de geração de energia elétrica.

A solução proposta é uma microrrede baseada em uma usina de cana-de-açúcar real com a adição de novos subsistemas de geração renovável. Esta solução é modelada de acordo com a metodologia dos Energy Hubs como uma interface generalizada entre produtores, consumidores e linhas de transmissão de energia. Tal formalização permite alta flexibilidade em termos de detalhe de modelagem matemática e precisão. Em seguida, uma abordagem para o funcionamento ótimo

desta microrrede é detalhada, seguindo a metodologia do Controle Preditivo baseado em Modelo.

Este documento é organizado da seguinte forma: primeiramente objetivos são apresentados; em seguida, métodos de modelagem e de controle são discutidos; resultados de simulação do sistema mostrados e análise de custo detalhada é feita; por fim, conclusões são apresentadas.

Objetivos

Como foi explicado, este trabalho propõe uma estrutura genérica para geração híbrida de energia, baseada em plantas de processamento de cana-de-açúcar, de forma a integrar o uso de fontes renováveis à matriz energética brasileira de forma factível.

A Indústria da Cana-de-Açúcar

A maioria das usinas que processam a

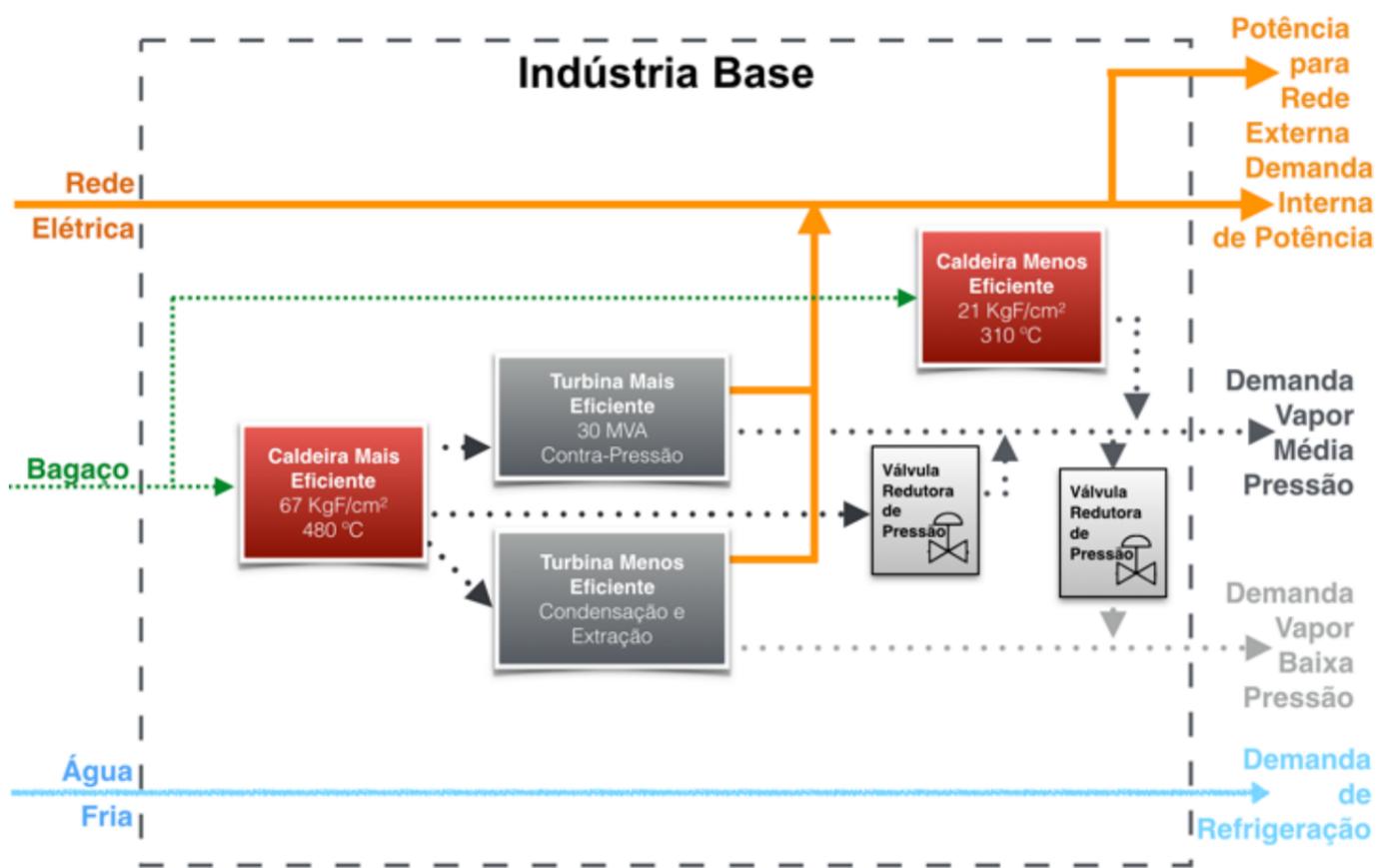


Fig. 1: Indústria base.



Fig. 2: Estoque de bagaço em um canavial.

Cana-de-açúcar no Brasil tem uma estrutura de funcionamento similar. Essas indústrias apresentam diversas demandas internas devido à produção de açúcar e etanol, tais como: produzir vapor a diferentes níveis de pressão; produzir água fria para resfriar equipamentos (tanques com óleo quente, entre outros); e produzir energia elétrica para manter a própria usina. Além disso, a energia elétrica excedente é costumeiramente vendida a um distribuidor local (rede externa).

Na figura 1 é apresentada uma representação de uma indústria de processamento de cana-de-açúcar típica (chamada aqui de Indústria Base), com todos seus subsistemas, entradas e saídas. Vale ressaltar que uma prática comum nos canaviais é a estocagem de bagaço em pilhas, como retrata a figura 2. Essas pilhas podem ter até 300 m de largura, 100 m de comprimento e 40 m de altura, como detalhado em (Santos, Lima, Nassar, Ciuffi & Calefi, 2011), estocando mais de 100000 toneladas desta biomassa. Assim sendo, este trabalho considera que a Indústria Base tem sua própria área dedicada ao armazenamento de bagaço.

Mistura de Biomassa

Uma das principais mudanças na Indústria Base proposta neste trabalho é como as caldeiras devem ser movidas com uma mistura apropriada de biomassa.

Como detalham Innocente (2011) e Maués (2007), uma maximização do poder calorífico do bagaço pode ser atingida se este é apropriadamente misturado com palhiço. Neste sentido, a tabela 1 visa justificar porque

deve-se usar uma mistura de bagaço com palhiço, ressaltando que um poder calorífico mais elevado acarreta em uma maior geração energética.

Assim sendo, uma das propostas deste trabalho é escolher um fator de mistura de biomassa ótimo, tal que a produção de vapor pelas caldeiras sempre seja maximizada.

A Microrrede Proposta

Agora, esta subseção detalhará o sistema de geração híbrido proposto para o cenário energético brasileiro, composto de subsistemas a serem adicionados a Indústria Base.

A microrrede proposta é composta dos subsistemas listados abaixo. Uma representação completa é vista na figura 3.

Os elementos mantidos da Indústria Base, são:

- Duas caldeiras, com diferentes eficiências;
- Duas turbinas, de diferentes eficiências;
- Duas válvulas redutoras de pressão;
- Um estoque de bagaço.

Os elementos a serem adicionado à Indústria Base são:

- Uma estrutura de geração de calor e potência combinada (chamada de CHP);
- Um resfriador de água;
- Um tanque armazenador de água quente;
- Painéis fotovoltaicos (FV);
- Painéis de aquecimento solar (AS);
- Uma turbina eólica;
- Um estoque de palhiço;

Tabela 1: Misturas de biomassa

Amostra	Poder Calorífico Superior	Potencial Energético
100% Bagaço	17.90 M.J/kg	1.40
90% Bagaço 10% Palhiço	18.66 M.J/kg	1.42
80% Bagaço 20% Palhiço	18.59M.J/Kg	1.49
70% Bagaço 30% Palhiço	18.42 M.J/kg	1.54
60% Bagaço 40% Palhiço	18.28 M.J/kg	1.50
50% Bagaço 50% Palhiço	18.05 M.J/kg	1.65

- Um trocador de calor (sistema que converte vapor a alta pressão em água quente);
- Um biodigestor de vinhaça, responsável pela produção de biogás;
- Um tanque para o estoque de biogás comprimido;
- Um banco de baterias.

Esta microrrede generalizada é uma adaptação plausível de uma indústria de processamento de cana-de-açúcar que já produz sua própria energia. Ela é interessante, sob um olhar ecológico, pois propõe o uso de fontes renováveis e a reciclagem dos resíduos da cana-de-açúcar.

Comparando a Indústria Base e a microrrede proposta, há um aumento na capacidade de geração de energia e, além disso, um aumento da eficiência e da sustentabilidade entre os sistemas. A microrrede visa usar a melhor tecnologia possível de tal forma a respeitar normas mínimas ambientais e o estado da arte em automatização de processos (com técnicas de controle e modelagem avançadas a serem detalhadas na próxima seção).

É importante ressaltar que os subsistemas adicionais propostos são viáveis dentro do contexto brasileiro. Como exemplo, muitas das indústrias de cana-de-açúcar situam-se no Brasil, em locais de alta insolação anual e grande disponibilidade de vento, onde painéis FV e turbinas eólicas encaixam-se perfeitamente.

tamente.

Vale ressaltar que os símbolos Q_{E^A} e Q_{E^B} , na figura 3, representam fluxos de misturas de biomassa (bagaço combinado com palhaço de forma ótima) que propulsionam as caldeiras.

Sobre os subsistemas da microrrede: as caldeiras devem operar de tal forma a produzir as demandas internas de vapor; já as turbinas e o CHP visam produzir energia elétrica que, junto com a geração renovável dos painéis FV e da turbina eólica, devem atender as demandas energéticas.

O CHP é um gerador de energia de altíssima eficiência, movido a gás. Com a combustão do gás de entrada, este sistema produz energia elétrica e, também, água quente. No caso deste estudo, o CHP é propulsionado com o uso de biogás proveniente da digestão anaeróbica da vinhaça.

A proposta desta microrrede foi baseada em um estudo de uma planta real de processamento de cana-de-açúcar, localizada no estado do Paraná. É importante notar que este sistema de geração de energia híbrida está sujeito a diversas restrições de operação. Como tratar estas restrições é um problema de Controle Ótimo, detalhado na próxima seção.

Métodos

Nesta seção, serão mostrados os métodos uti-

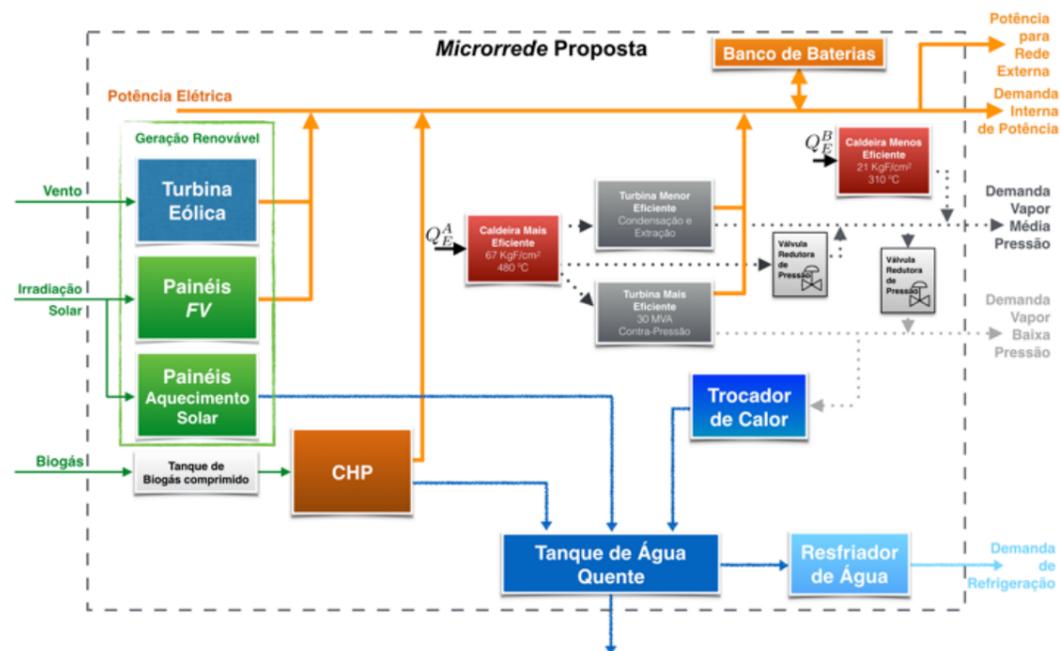


Fig. 3: Microrrede generalizada proposta.

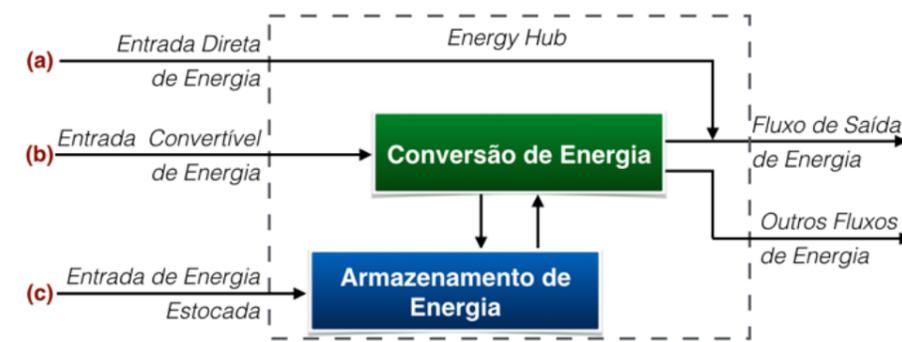


Fig. 4: Energy Hub

lizados para modelar e controlar a microrrede proposta. A modelagem aqui refere-se a como representar o sistema de um ponto de vista matemático, tal que este possa ser simulado (com uso de ferramentas adequadas) e analisado mais detalhadamente. Uma modelagem matemática eficiente permite que técnicas avançadas de Controle sejam aplicadas ao sistema proposto. Controle, por sua vez, diz respeito a como administrar um sistema de energia, tal que seja produzida a máxima quantidade possível de energia elétrica, dadas as condições de operação.

Os Energy Hubs

A modelagem seguida neste trabalho é a dos *Energy Hubs*, proposta em Geidl, Favre-Perrod, Klockl, Andersson & Frohlich (2007).

Um *Energy Hub* pode ser usado para modelar a interface entre produtores e consumidores de energia e a linha de transmissão. De um ponto de vista externo, um *Energy Hub* pode ser representado como um caixa-preta com os seguintes elementos: (1) entradas e saídas de potência elétrica; (2) conversão de energia e (3) armazenamento de energia. Isto é esquematizado na figura 3, onde (a), (b) e (c) podem coexistir, mas isso não é condição imperativa. Como exemplo, um painel FV é composto unicamente de (b), entretanto um banco de baterias é representado somente por (c).

Seguindo a modelagem matemática dos *Energy Hub*, encontra-se uma representação final a variáveis de estados, colocada em Morato et al. (2016). Este tipo de representação permite que um sistema seja descrito relacionando a sua condição em um próximo instan-

te de observação, dada a condição atual. Trata-se de um modelo de balanço de energia, onde a potência gerada é consumida, vendida ou armazenada e o controle escolhe como estas transferências de energia são executadas.

Controle Preditivo baseado em Modelo

Esta seção detalha as técnicas de controle aplicadas à microrrede. Neste trabalho é seguida a metodologia do Controle Preditivo baseado em Modelo (CPM), como foi outrora apresentado em Morato, da Costa Mendes, Normey-Rico & Bordons (2017). Resumidamente, a metodologia do CPM permite escolher, a cada hora, as configurações que devem ser aplicadas ao sistema para que se atinja uma produção energética máxima. Isso se dá através da solução de um problema de otimização quadrático sujeito a restrições. A figura 5 mostra um esquema de funcionamento do MPC. Nessa figura, a micro rede é representada pelo bloco processo e o MPC envia as ações de controle que são as potências dos elementos que podem ser manipulados. O MPC usa um modelo do processo para calcular as previsões do comportamento do mesmo em uma janela de tempo futura e, com base nestas previsões, resolve um problema de otimização que gera as ações de controle óti-

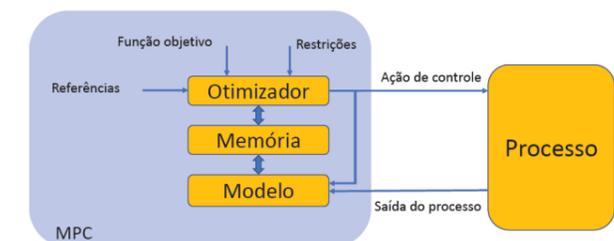


Fig. 5: Estrutura do MPC.

mas que atendem uma dada função objetivo, sempre satisfazendo as restrições de operação do sistema. No caso da microrrede, o objetivo é usar o máximo de energia renovável possível e minimizar os custos. As principais restrições estão associadas às potências máximas e mínimas de cada elemento, às capacidades dos armazenadores e às restrições de operação do sistema elétrico.

Resultados e discussão

Visando demonstrar a operação da microrrede de geração híbrida proposta, esta seção expõe alguns resultados de simulação e uma análise de custo para uma possível implementação futura.

i) Resultados de Simulação

As simulações aqui mostradas foram obtidas usando os seguintes softwares: *MATLAB*, *Yalmip* e *CPLEX*.

Para um primeiro cenário, consideramos a geração de energia proveniente da microrrede proposta, dado um mês de disponibilidade média de sol e vento. Os respectivos resultados são colocados na figura 6, onde observa-se a energia total vendida, a energia produzida pelas turbinas, pelo CHP e pelas fontes renováveis.

Já na figura 7, observa-se um segundo cenário considerando apenas a produção pela Indústria Base. Neste cenário, considera-se que as caldeiras são propulsadas pelo uso de gás natural (sem a reutilização dos resíduos da cana), gastando aproximadamente 11.78 toneladas de gás.

Como pôde ser visto, o ganho em ter-

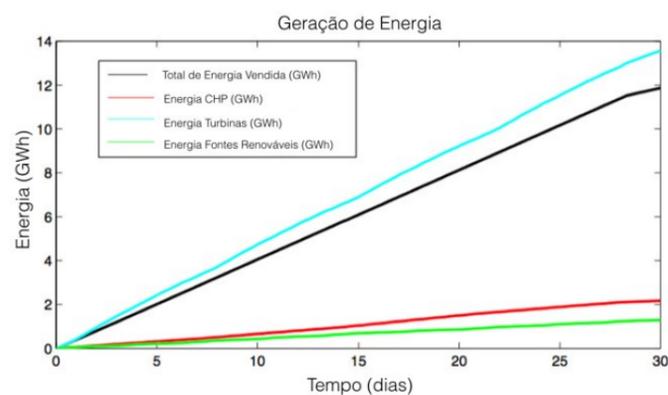


Fig. 6: Primeiro cenário da simulação.

Tabela 2: Ganhos com a microrrede.

Subsistema	Ganhos Energéticos	Lucro Aproximado
CHP	1920 MWh	\$ 89,376.00
Painéis FV	-	-
Alta Insolação	228 MWh	\$ 10,613.40
Média Insolação	189MWh	\$ 8,797.95
Baixa Insolação	123.6 MWh	\$ 5,753.58
Turbina Eólica	-	-
Muito Vento	1578 MWh	\$ 73,455.90
Vento Médio	888 MWh	\$ 41,336.40
Pouco Vento	498 MWh	\$ 23,181.90

mos de produção de energia, é muito grande se compararmos a microrrede proposta com a Indústria Base.

Já em termos de energia limpa, sustentável e lucro aproximado, em um mês de geração, o leitor deve observar a tabela 2, que justifica ainda mais a importância da microrrede proposta.

ii) Análise de Custo

Para explorar ainda mais a viabilidade do sistema de energia proposto, uma análise de custo através de técnicas de *payback* foi desenvolvida, com auxílio do software *HOMER Pro*. Os resultados obtidos mostram que o investimento neste sistema seria pago em até 5

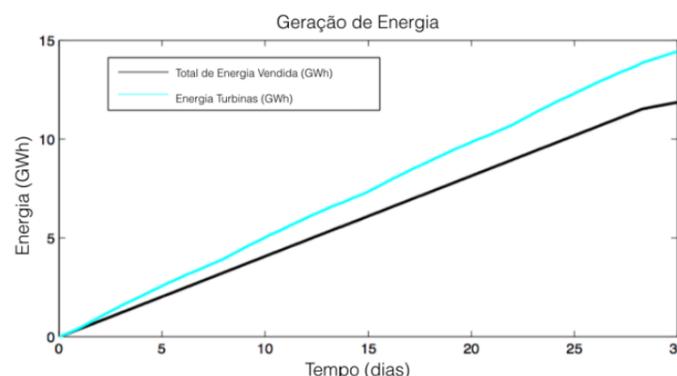


Fig. 7: Segundo cenário de simulação.

anos e um mês. Estes dados são detalhados na tabela 3.

Tabela 3: Análise de *Payback*.

Custo de Capital	\$ 16,966,791.30
Operação Manutenção	\$ 513,446.55
Lucro Venda Energia	\$ 8,394,598.06
Lucro Líquido	\$ 3,312,477.72
Tempo de <i>Payback</i>	5.12 anos

Conclusões

O planejamento da geração de energia está mudando bruscamente para países em desenvolvimento, como o Brasil. Este trabalho visou discutir como o paradigma da transição energética pode ocorrer no Brasil, de uma maneira viável, integrando diversos recursos energéticos renováveis. Para isso, uma possível estrutura de geração híbrida foi apresentada e analisada sob simulação, mas utilizando dados de plantas reais e considerando técnicas avançadas de controle.

Referências bibliográficas

- Johansson, T. B., & Burnham, L. (Eds.). (1993). Renewable energy: sources for fuels and electricity. Island press.
- Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished?. *Energy policy*, 37(1), 181-189.
- Dell, R. M., & Rand, D. A. (2001). Energy storage—a key technology for global energy sustainability. *Journal of Power Sources*, 100(1), 2-17.
- Lasseter, R. H. (2002). Microgrids. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE* (Vol. 1, pp. 305-308). IEEE.
- Mantovani, P. R. A., Neumann, P. N., & Edler, M. A. R. (2017). Matriz energética brasileira: em busca de uma nova alternativa. *Revista interdisciplinar de ensino, pesquisa e extensão*, 4.
- Tiba, C. (2000). Atlas Solarimétrico do Brasil.
- Alves, J. M. (2006). Paradigma Técnico e co-geração de energia com bagaço da cana de açúcar em Goiás. In *60 Encontro de Energia no Meio Rural*, 2006.
- Dantas, G. A., Legey, L. F. L. & Mazzone, A. (2013). Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. *Renewable and Sustainable Energy Re-*

views, 21, 356-364.

Leal, M. R. L., Galdos, M. V., Scarpate, J., Seabra, E., Walter, A. & Oliveira, C. O. (2013). Sugar cane Straw availability, recovery and energy use: a literature review. *Biomass and Bioenergy*, 53, 11-19.

Bernal, A. P., dos Santos, I. F. S., Silva, A. P. M., Barros, R. M., & Ribeiro, E. M. (2017). Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO 2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, 151, 260-271.

Demirbas, A. (2008). Biofuel sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy conversion and Management*, 49, 2106-2116.

Galus, M. & Andersson, G. (2011). An approach for plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) integration into Power Systems. *Smart Energy Strategies Conference*.

Santos, M. L. D., Lima, O. J. D., Nassar, E. J., Ciuffi, K. J., & Calefi, P. S. (2011). Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Química Nova*, 34(3), 507-511.

Innocente, A. F. (2011). Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar: estudo de caso.

Maués, J. A. (2007). Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usinas de açúcar e álcool. *Revista Engenharia*, 583, 88-98.

Geidl, M., Koeppl, G., Favre-Perrod, P., Klockl, B., Andersson, G., & Frohlich, K. (2007). Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 5(1), 24-30.

Morato, M. M., Mendes, P. R. C., Bertol, D. W., Cembranel, D., Normey-Rico, J. E. & Bordons, C. (2016). Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2016.

Morato, M. M., da Costa Mendes, P. R., Normey-Rico, J. E., & Bordons, C. (2017). Optimal operation of hybrid power systems including renewable sources in the sugar cane industry. *IET Renewable Power Generation*.

Camacho, E. F., & Bordons, C. (2013). Model predictive control. Springer Science & Business Media.

Um Sistema de Gerenciamento de Energia *QoE-aware* baseado em Controle Preditivo

Autores: José Diogo F. Luna (IFRO-mestrando PPGEAS), Gustavo C. Balbinot (IFRO), Guilherme N. dos Reis (graduação UFSC), Paulo Renato Mendes (FIIM-pós-doutorado PPGEAS) e Prof. Julio E. Normey-Rico.

Esta pesquisa tratou do desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Energia que utiliza Controle Preditivo e uma estratégia de Gestão de Demanda baseada em indicadores de contentamento do usuário final. Do projeto participaram mestrandos, pós doutorandos do PPGEAS e estudantes de graduação.

Geração e demanda em redes elétricas

A operação estável de uma rede elétrica depende do equilíbrio entre a geração e o consumo de energia. Manter este equilíbrio, especialmente em horários de pico, requer uma série de mecanismos que podem incluir técnicas de gestão de demanda (GD). A GD se caracteriza por intervenções no padrão de consumo de energia dos consumidores. Isto pode ser feito através de incentivos financeiros, com tarifas variáveis, ou, mais recentemente, com o advento de tecnologias da informação, com o uso de sistemas gestores de energia (SGE) associados a cargas inteligentes. O SGE utiliza uma determinada estratégia de controle para tomar decisões de geração, consumo, armazenamento, compra e venda de energia em uma rede.

Técnicas de gestão de demanda objetivam achatar a curva de demanda, aumentando a demanda em horários de baixo consumo e, reciprocamente, reduzir o consumo em horários de pico. Na prática, isto implica deslocar cargas de um horário para outro, ou modificar a forma como aquela carga consome energia, ceifando-a momentaneamente ou suprimindo uma parte do consumo dela.

Independentemente da forma como a

gestão de demanda atue sobre as cargas, é sabido que ela irá causar desconforto nos usuários do sistema elétrico, uma vez que mudanças no perfil de consumo de energia implicam mudanças de rotina. Mensurar o impacto no conforto do usuário é tarefa mais complexa do que mensurar o impacto no sistema elétrico, visto que, a priori, não existe uma relação direta entre o impacto no conforto do usuário e um valor monetário, por exemplo. Trata-se de um problema de grande importância que tem sido pouco tratado na literatura.

Uma forma de quantificar a experiência humana frente a ações de gestão de demanda, é através de métricas de qualidade de experiência (QoE). O QoE é uma métrica definida como o grau de satisfação e conforto que um usuário experimenta com um certo serviço, resultante do grau de atendimento das expectativas referentes àquele serviço. Assim, ela pode ser usada para avaliar a interação entre o usuário e o sistema de gestão de demanda. Alguns trabalhos já foram realizados recentemente nessa área, utilizando questionários usados para, por exemplo, descrever e quantificar o desconforto do usuário com o deslocamento no horário de uso de uma dada aplicação doméstica. Com os dados das respostas geram-se perfis de usuários mais ou menos tolerantes a intervenções em cada equipamento. Finalmente, estes perfis são usados no sistema de GD, que utiliza regras para minorar o custo de operação da residência, mas sem extrapolar limites de QoE.

Objetivo principal

Nesta pesquisa, que é a primeira realizada no Brasil, o estudo focou nos potenciais usuários de casas inteligentes de Florianópolis, munidas de geração fotovoltaica e um Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (SAEB). Assim, o SGE, que usa controle preditivo (CP), busca obter um compromisso entre consumo de energia e desconforto medido com QoE. O SGE decide as ações de GD através da resolução de um problema de otimização.

Estudo de caso

No sistema estudado, assume-se que o SGE será responsável por decidir que parte da energia da geração fotovoltaica é usada ou armazenada nas baterias ligadas a um barramento DC. Um conversor bidirecional—responsável por realizar a interface entre o barramento DC e AC. As cargas estão ligadas ao barramento AC e a casa inteligente também pode ser alimentada com a energia da rede da concessionária. As cargas estão classificadas em quatro categorias, sendo elas: 1) convencionais, são cargas prioritárias ou não-controláveis que não são adequadas para as ações da GD; 2) cargas deslocáveis, que podem ter o seu tempo de partida antecipado ou adiado; 3) cargas suprimíveis, que podem ter o seu consumo reduzido numa certa fração; e 4) se a carga for simplesmente *on-off*, são consideradas cargas ceifáveis.

Descrição do SGE

Para implementar o SGE baseado no CP, faz-se necessário descrever o problema de otimização que será resolvido de acordo com o

tempo de amostragem escolhido para o SGE.

Na Figura 1, é possível observar a estrutura do SGE, o qual é responsável por tomadas de ações inteligentes controlando o consumo das cargas. Adicionalmente, é possível observar as cargas que estão ligadas a esta casa, a lâmpada representa uma carga *on-off*, a máquina de lavar representa uma carga deslocável, o ar condicional representa uma carga suprimível e a geração fotovoltaica representa uma fonte não-controlável. Também é possível visualizar a interação do SGE com a rede elétrica da concessionária.

Devido o SGE ser baseado no CP, faz-se necessário a modelagem matemática do sistema. Como o CP define suas ações através de um otimizador, é necessário formular o problema de otimização a ser solucionado. Neste caso, deseja-se minimizar o valor de uma função objetivo que representará custo diário de consumo de energia desta casa. Para além disso, este estudo leva em consideração o confor-

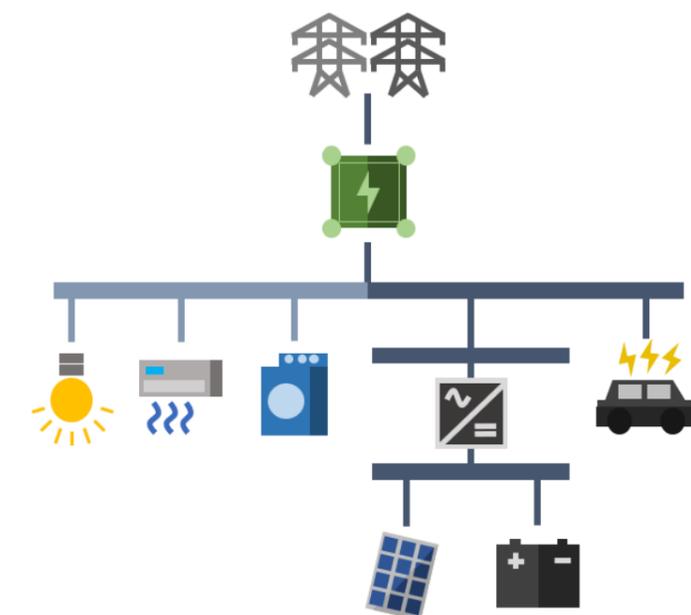


Fig. 1: Composição da casa inteligente do estudo de caso.

to dos habitantes da casa perante ações de gestão de demanda. Deste modo, o SGE irá moderar a suas ações de acordo com a subjetividade do proprietário, mensurada por uma métrica QoE. Para um maior detalhamento, a modelagem será descrita por itens a seguir.

Barramento DC

O balanço de potência DC para o barramento DC considera que as potências consumidas através do conversor DC/AC e pelo Sistema de Armazenamento de Energia (SAE) devem ser iguais à potência gerada através de uma Fonte de Energia Renovável (FER). Caso a FER produza energia excedente, esta será armazenada no SAE. Caso contrário, o SAE pode ajudar a suprir a demanda.

Energia renovável

Assume-se que a energia renovável é provida através de geração fotovoltaica, considerando a capacidade do conversor DC/DC que liga a FER ao barramento DC. Assim, a potência que será entregue ao barramento DC através do conversor estará compreendida entre 0 e sua potência nominal.

Sistema de armazenamento de energia em bateria

O foco na modelagem do SAEB é contabilizar o estado de carga (EdC), onde deseja-se manter EdC entre seu valor mínimo e máximo, objetivando sua melhor vida útil. Deve-se considerar suas limitações físicas, para que a ação do SGE não seja discrepante com a realidade. As principais limitações físicas são a capacidade de armazenamento de energia e a eficiência de carga e descarga. Entretanto, ao se modelar o SAEB cai-se em uma bi-linearidade, que pode ser resolvida através do uso de uma técnica de modelagem mista dinâmica inteira (conhecida como MLD).

Interface de conversão

A capacidade de conversão do conversor que faz a interface dos barramentos AC e DC está limitada pela potência ativa e aparente.

Barramento AC

Para a modelagem do barramento AC, deve-se respeitar o balanço de potência, sendo que a potência complexa fornecida através da rede e do conversor devem ser consumidas pelas cargas.

Fator de potência

Para o fator de potência, deseja-se cumprir as limitações do fator de potência consumida ou fornecida à rede principal. Essa limitação para o caso brasileiro é imposta sendo no valor de 0,92.

Carregador da bateria do carro elétrico

Para este estudo, considera-se que a residência possui um sistema para carregar baterias de veículos elétricos (VE) e assume-se que a bateria deve ser carregada quando o VE estiver estacionado na garagem do proprietário, por exemplo, durante a noite, para estar pronto para ser utilizado no dia seguinte. Note que o SGE atualiza esse requisito com informações fornecidas explicitamente pelo dono da casa ou através de técnicas de aprendizagem de máquina, através do histórico do estacionamento do VE.

A modelagem é feita de forma análoga ao SAEB, quando também deseja-se contabilizar o EdC do veículo para que ele esteja pronto para o uso. Considerando que a operação V2G (Vehicle-to-Grid) será permitida, ajusta-se o SGE para que ele possa utilizar a energia armazenada na bateria do VE para o consumo das cargas da residência, caso o VE esteja estacionado.

Ar condicionado

Os sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) representam outra preocupação das casas inteligentes, uma vez que são responsáveis pelo conforto térmico e pela qualidade do ar e, por conseguinte, devem ser abordados pelo SGE. Considera-se que esta casa esteja equipada com um ar condicionado baseado no sistema *inverter*, onde o principal objetivo através dessa modelagem é verificar se a temperatura interna da casa está conforme o proprietário deseja. Para esta modelagem, é necessário levar em consideração a dinâmica da temperatura no ambiente. Essa dinâmica pode ser aproximada através de um circuito elétrico, conforme a Figura 2. Considera-se T_a a temperatura externa, R_t a resistência térmica, U é um ganho, T_i a temperatura interna e C_t a capacidade térmica equivalente.

Carga deslocáveis

O funcionamento de uma carga controlável cujo o tempo de acionamento pode ser deslocado pelo SGE, mas não pode ser desligada uma vez iniciada, a modelagem para as potências é análoga à da bateria do VE.

Considerando que a curva que descreve o quanto uma ação do GD para uma determinada carga deslocada é composta por uma curva de antecipação e uma curva de adiamento desta carga, a curva resultante pode ser aproximada como uma função afim por partes.

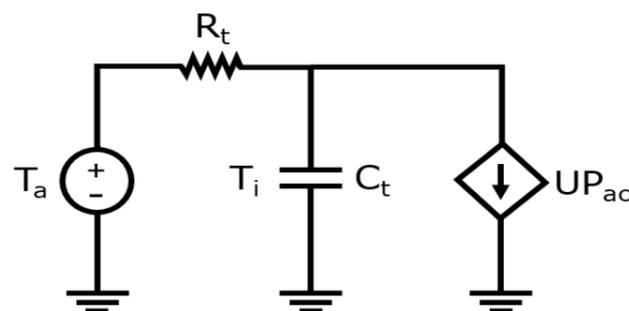


Fig. 2: Modelo do circuito equivalente.

mento desta carga, a curva resultante pode ser aproximada como uma função afim por partes.

Considerando os resultados do QoE, a função para uma carga deslocável poderá ser aproximada por cinco funções afins para antecipação e outras cinco para adiamento, somando dez funções afins. Um exemplo é ilustrado na Figura 3. Esta curva pode ser usada para computar o efeito das ações de GD no conforto do usuário, para fins de cômputo da função objetivo.

Carga suprimível

A Figura 4 demonstra que o desconforto aumenta à medida que a temperatura se distancia da temperatura desejada, uma vez que as funções elencadas para as cargas suprimíveis são compostas por uma curva unilateral. Também pode-se adotar a estratégia de incluir o QoE como uma função afim por partes para contabilizar seu impacto na função objetivo.

Função custo

Como foi mencionado anteriormente, o objetivo é minimizar uma função custo que considera duas parcelas, uma com o valor mensal da fatura de energia elétrica e outra referente ao desconforto do usuário, baseadas em mé-

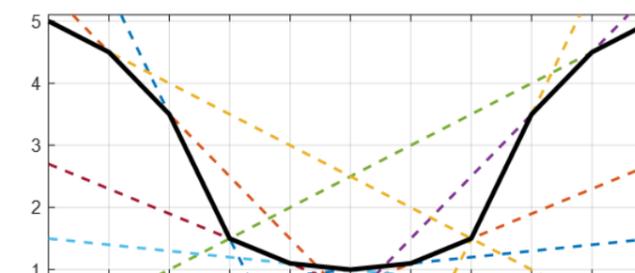


Fig. 3: Desconforto com tempo de deslocamento de carga. Preto: representação por partes. Colorido: funções afins.

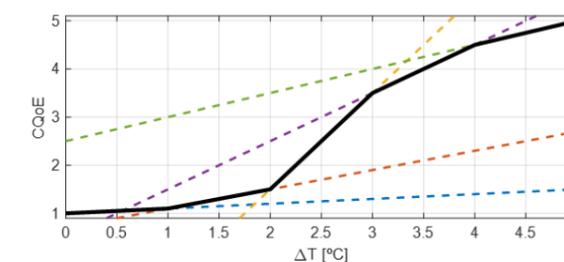


Fig. 4: Desconforto com erro de temperatura da casa. Preto: representação por partes. Colorido: funções afins.

tricas QoE.

Para este trabalho foi adotada a tarifa branca, que consiste em três faixas horárias de custo de consumo diferente, desta forma, o SGE deverá adotar uma estratégia para que se utilize a rede de tal forma que se beneficie desta tarifa, levando em consideração os dados obtidos através do QoE.

Simulação: casa inteligente

Para ilustrar a aplicação do controle proposto, denominado SGE-QoE e baseado em CP, foi simulada uma casa inteligente com uma carga convencional instalada de 12,16 kVA. Essa é a carga sobre a qual o SGE não pode agir, isto é, que não são sujeitas a ações de GD, como iluminação artificial ou geladeiras, por exemplo. O comportamento de consumo destas cargas, utilizado na simulação, é apresentado na Figura 6.

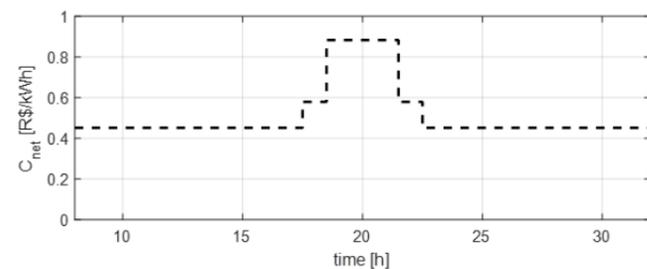


Fig. 5: Valor da tarifa branca para os diferentes horários.

Considera-se que a casa inteligente possui uma lavadora inteligente que pode ser controlada pelo SGE e se comporta como uma carga deslocável. Ela deve operar por 45 minutos seguidos e o horário de preferência do usuário para a partida do equipamento é 18h.

Adicionalmente, o sistema de condicionamento de ar da residência é controlado pelo SGE, tendo tecnologia inverter e possibilitando não apenas ser ligado e desligado, mas forçado a operar em potência abaixo da sua potência nominal. Adota-se, para o caso da simulação, uma temperatura externa variando de 28 °C ao meio dia, até 20°C à meia noite. A

temperatura desejada pelo usuário é de 18°C entre 19h e 4h do dia seguinte, isto é, se deseja que o ar condicionado permaneça ligado durante a maior parte da noite. Durante o resto do dia, não se deseja ligar o ar condicionado, presumindo o usuário fora de casa.

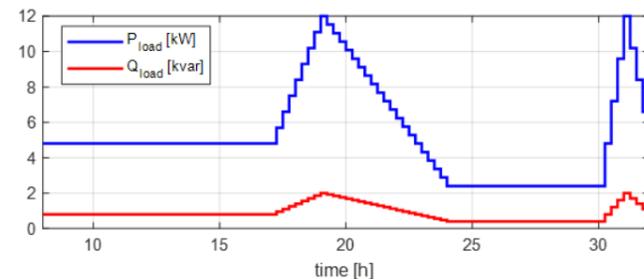


Fig. 6: Perfil de carga da residência para o cenário.

Além disso, o usuário possui um VE, cujo carregador inteligente pode ser comandado pelo SGE, devendo atender o requisito de completar a carga da bateria até as 7hs da manhã, após o carro ser conectado no início da noite. A bateria tem capacidade de 30 kWh e o carregador consegue entregar até 6 kW de potência. Para o cenário, assume-se que o carro é estacionado ainda com 40% da bateria carregada.

Resultados

Simulando a operação por um período de 24 horas, das 8h de um dia até as 8h do dia seguinte e adotando-se um horizonte de predição de 36 amostras, é possível observar o comportamento do sistema com o controle projetado.

Na Figura 7 é possível observar o comportamento do barramento DC do sistema. Durante a manhã, a demanda é suprida majoritariamente pela geração fotovoltaica. Após o meio dia, o SGE começa a carregar a bateria e a descarrega durante os horários mais caros da tarifa branca, efetivamente aproveitando para consumir o excedente da geração renovável no horário mais conveniente, sob a ópti-

ca financeira.

Na Figura 8 tem-se o comportamento do barramento AC, onde se nota que durante a manhã e a tarde o sistema consome pouco da rede da concessionária, por conta da pouca demanda e da presença de FER. Após o pôr do sol, o SGE começa a comprar energia da rede, mas o pico de carga é ceifado pelo uso do SAEB.

No que tange às cargas inteligentes, o ar-condicionado é ligado durante o dia, usando o excesso de geração FER para manter a temperatura abaixo da temperatura externa, reduzindo o esforço de atender a temperatura desejada do usuário, em pouco tempo, após ele chegar. Dada a inércia térmica, há necessidade de um gasto menor de potência para atender o requisito de temperatura. Entretanto, o requisito não é atendido completamente por conta do perfil mais permissivo do usuário referente ao QoE da temperatura e o SGE decide manter a temperatura levemente acima da desejada, conforme a Figura 9, em 19 °C

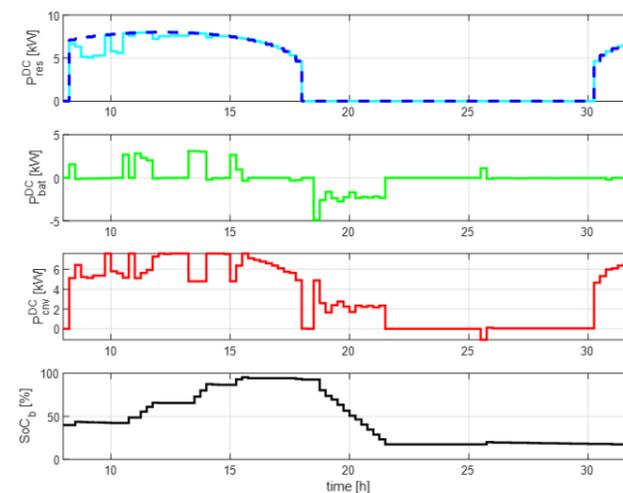


Fig. 7: Barramento DC. De cima para baixo, azul tracejado: geração FER disponível, azul claro: potência aproveitada pelo conversor FER, verde: potência consumida pelo SAEB, vermelho: potência processada pelo conversor, preto: EdC da bateria.

Cabe notar que o comportamento varia de acordo com o perfil de QoE do usuário referente ao condicionamento de ar. Na Figura

10, vê-se como o perfil afetaria a decisão do SGE.

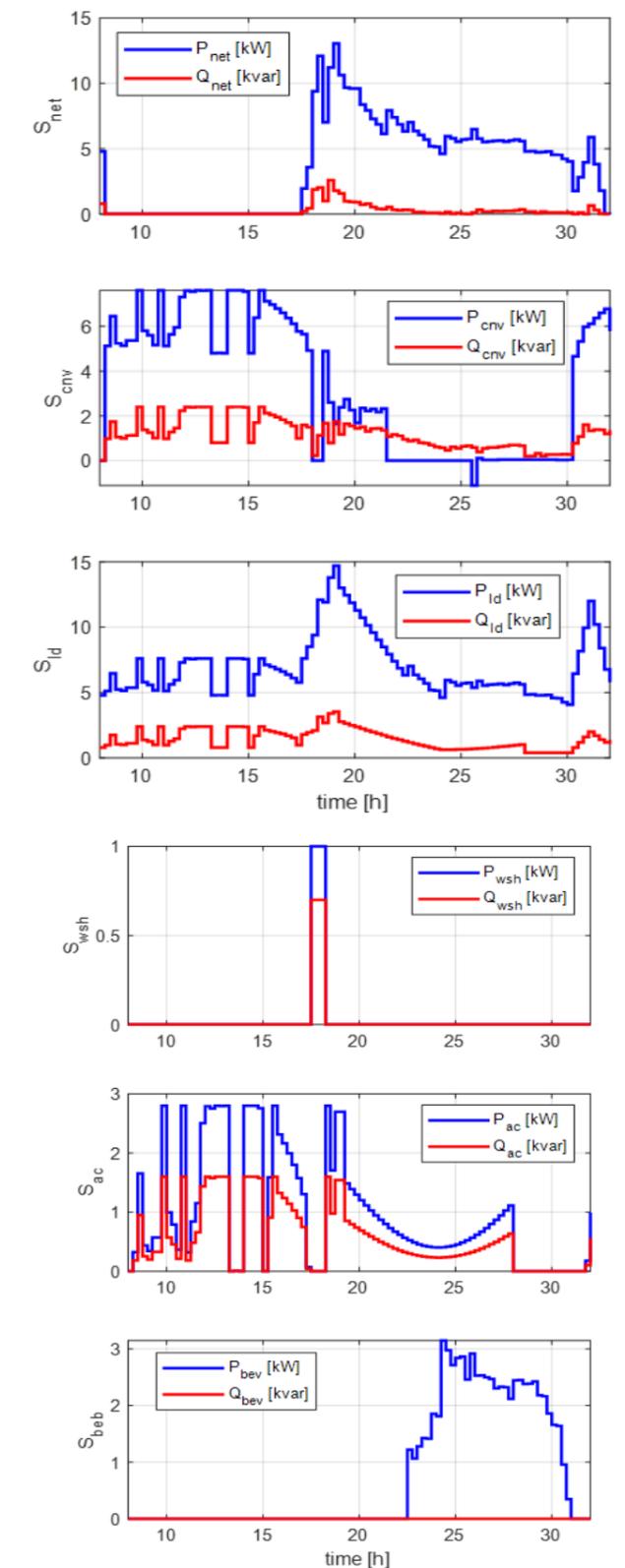


Fig. 8: Barramento AC. De cima para baixo: potência ativa e reativa comprada da rede, potência ativa e reativa entregue pelo conversor a partir do barramento DC, potência ativa e reativa consumida pelas cargas, potência ativa e reativa da máquina de lavar, potência ativa e reativa do ar condicionado e, por fim, a potência ativa e reativa do BEV.

O carregamento da bateria do VE é postergado até o limite, esperando o fim das horas mais caras da tarifa branca para completar a carga da bateria.

A Figura 12 mostra o comportamento da máquina de lavar. Apesar do horário desejado, o SGE decide antecipar o seu horário de funcionamento em meia hora, fugindo do horário de pico da tarifa, mas, ao mesmo tempo, respeitando os valores aceitáveis de desconforto no usuário e, por isso, rodando parte do programa no horário intermediário. Cabe notar que, caso não fosse considerado o QoE, o

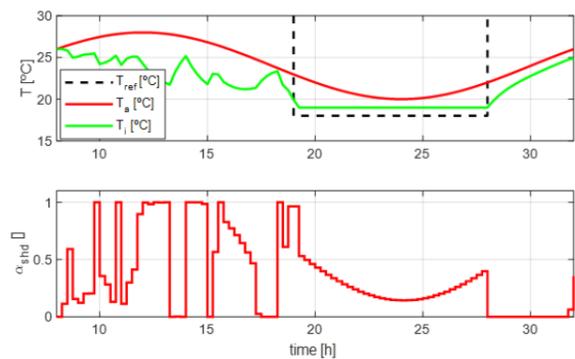


Fig. 9: Ar condicionado. Superior, preto tracejado: temperatura setpoint, vermelho: temperatura exterior, verde: temperatura interior. Inferior: porcentagem de potência de arrefecimento utilizada.

SGE poderia simplesmente adiantar várias horas o horário de funcionamento, porém, isso implicaria na permanência da roupa lavada por pendurar durante um longo período, implicando em menor satisfação do usuário.

Para prover um *insight* adicional no efeito da inclusão do QoE no SGE, fez-se uma comparação de três casos, sendo o Caso 1 o apresentado acima, com um *trade-off* entre conforto e redução da tarifa de energia, um Caso 2 considerando apenas o custo financeiro e um Caso 3 com uma ponderação pequena para o custo financeiro, dando maior ênfase ao conforto.

No Caso 2, desconsiderando o QoE, o SGE inicia a lavadora às 15h15, usando o excesso de geração solar. De forma similar, a decisão do SGE seria simplesmente não ligar o ar condicionado durante a noite, enquanto o comportamento da carga do BEV seria o mesmo do Caso 1. Estas decisões implicam em uma redução de 12,25% na conta de energia.

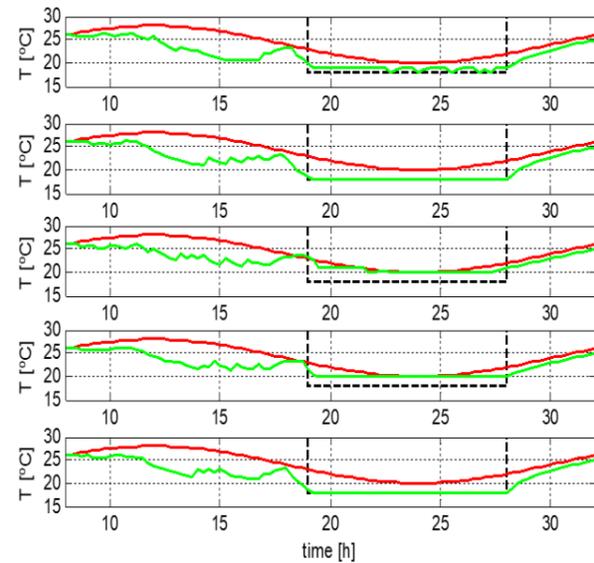


Fig. 10: Resposta de temperatura a diferentes curvas de QoE para a restrição de ar condicionado. Destaque para a terceira curva, de um perfil mais leniente, que aceita uma boa redução na temperatura contra a quinta, que tolera pouca interferência do SGE. Vermelho: temperatura exterior, verde: temperatura interior, preto tracejado: temperatura desejada.

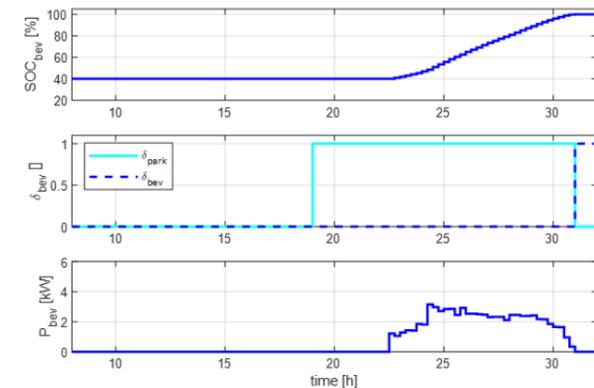


Fig. 11: Carregador de bateria do VE. Acima: estado de carga da bateria. Meio, azul claro: tempo durante o qual o BEC está estacionado em casa, azul tracejado: variável trigger que indica a conclusão da carga. Inferior: energia consumida pelo carregador.

No Caso 3, usando uma ponderação diminuta no gasto de energia, o SGE escolhe ini-

ciar a lavadora no horário designado pelo usuário, operando-a no horário de ponta durante parte do funcionamento. A temperatura desejada é seguida com rastreamento quase perfeito e a bateria do VE é carregada o mais rapidamente possível. Este comportamento leniente do SGE para com o usuário implica

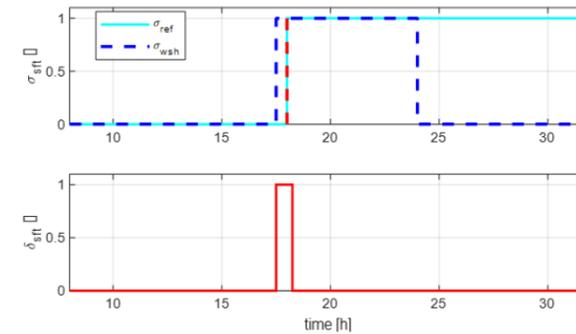


Fig. 12: Máquina de lavar exemplificando carga deslocável. Estado da máquina de lavar roupa.

num aumento de 18,44% na conta de energia, com relação ao Caso 1.

Considerações finais

Apesar de as técnicas de gestão de demanda serem bem documentadas na literatura, uma das questões que permanece aberta é uma forma de considerar a inconveniência causada ao usuário por ações de GD. O uso de métricas QoE para quantificar e ponderar o desconforto de tais ações tem ganhado espaço na comunidade científica como uma resposta promissora. Neste sentido, este trabalho apresentou uma proposta do uso do QoE dentro da formulação de um problema de otimização, de modo a propor um SGE QoE-aware baseado em CP. Conforme os testes por simulação, o sistema proposto seria capaz de gerenciar os recursos disponíveis para minorar picos de consumo e fazer escolhas que reduzam a conta de energia no final do mês, ao mesmo tempo que levam em conta a satisfação do usuário, para lhe entregar uma experiência customizada, sem interferir significativamente nos seus hábitos. Afinal, o objetivo maior de qual-

Tabela 1: Métricas de desempenho para cada caso. O CQoEI indica o desconforto causado pelo deslocamento da lavadora, enquanto o CQoEt o desconforto referente à temperatura. Para ambas as métricas, quanto menor o valor, melhor o desempenho.

Caso	1	2	3
CQoEI	1,2813	4,1418	1,0000
CQoEt	0,3686	19,1493	0,0035
Custo R\$	53,3908	46,8502	63,2351

quer tecnologia é trazer satisfação aos seus usuários e isso não precisa ser diferente para a gestão de energia nesse novo paradigma de consumo inteligente.

Referências bibliográficas

- LUNA, José Diogo Forte de Oliveira; REIS, Guilherme Nascimento Gouvêa dos; MENDES, Paulo Renato da Costa; NORMEY-RICO, Julio Elias. Characterizing quality of experience for demand management in South Brazil. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 130, p. 106709, 2021.
- LUNA, José Diogo Forte de Oliveira et al. Contributions to MPC-based microgrid central controllers. 2019.
- FLORIS, Alessandro et al. A qoe-aware approach for smart home energy management. In: 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2015. p. 1-6.
- FLORIS, Alessandro et al. A quality of experience prediction model for smart home energy management systems. In: 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2018. p. 1-6.
- LI, Mingfu; JIANG, Cheng-Wei. QoE-aware and cost-efficient home energy management under dynamic electricity prices. In: 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE, 2017. p. 498-501.
- LI, Mingfu et al. QoE-aware smart home energy management considering renewables and electric vehicles. *Energies*, v. 11, n. 9, p. 2304, 2018.
- PILLONI, Virginia et al. Smart home energy management including renewable sources: A qoe-driven approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 3, p. 2006-2018, 2016.

Operação Ótima de Coletores Solares Térmicos usando Controle Hierárquico Baseado em Exergia

Autores: Diogo O. Machado (doutorando PPGEAS), Prof. Julio E. Normey-Rico, Prof Gustavo A. de Andrade e Prof. Carlos B. Alba (Universidade de Sevilha - Espanha)

Resumo

Este artigo descreve uma prova de conceito utilizando simulações no campo solar ACUREX que busca integrar o tema de controle com o conceito de exergia. As simulações consideram a partida e desligamento da planta, restrições operacionais, energia de bombeamento e dados meteorológicos reais. O controle baseado em exergia é comparado com as abordagens da literatura e apresenta desempenho favorável.

Introdução

O campo solar de ACUREX foi construído em Almería, na Espanha, sendo composto por coletores solares de concentração. O trabalho foca no controle de tais coletores, que são trocadores de calor, os quais utilizam espelhos para focar a energia renovável do sol. A irradiação concentrada é absorvida por um tubo receptor que conduz o calor através de suas paredes para um fluido de trabalho que escoar em seu interior. O líquido, por sua vez, aumenta sua energia interna e temperatura e pode, então, ser utilizado para uma ampla gama de aplicações, tais como: climatização residencial, calor de processos industriais ou, ainda, geração de energia elétrica.

O problema é que os processos solares estão sujeitos à intermitência natural do sol. Portanto, seus sistemas de controle automático devem considerar diariamente a partida e o desligamento da planta, bem como a variação das condições climáticas, uma vez que nebulosidades impactam rapidamente na opera-

ção. Além disso, um campo solar composto por diversos coletores em série e paralelo possui restrições operacionais, consumo de bombas, perdas de calor, perdas de carga e atrasos de transporte.

Os objetivos de controle nesse tipo de sistemas são tipicamente: (1) a operação segura, evitando-se o superaquecimento do coletor ou operação crítica; (2) seguimento de referência da temperatura de saída do coletor e rejeição de perturbações de irradiação, manipulando-se a vazão; e (3) a maximização da produção de energia. Nesse sentido, constatou-se que os trabalhos científicos que contribuem para atingir os objetivos de controle são complementares aos trabalhos que buscam maximizar a produção de energia da planta.

Os artigos focados no controle utilizam o controle hierárquico, técnica que divide os problemas de controle e otimização em duas camadas a fim de facilitar sua solução. Os trabalhos utilizam tipicamente controladores PID clássicos e controladores preditivos na camada de controle. Já na camada de otimização, a qual é responsável por gerar e enviar referências de temperatura de saída aos controladores, os artigos se baseiam principalmente em duas abordagens: (I) a maximização da energia produzida ou (II) maximização da temperatura. Assim, a questão que resta é: **qual das duas estratégias de otimização resulta em melhor aproveitamento da energia solar?**

Desenvolvimento

A problemática pode ser analisada a partir de um balanço de energia em regime permanente que se baseia na lei de conservação de energia, ou primeira lei da termodinâmica. O balanço é representado pela igualdade entre a taxa de energia produzida (retirada) do sistema através do escoamento do fluido de trabalho, $\dot{Q}_{produzido}$, e a diferença entre a energia solar incidente no absorvedor, \dot{Q}_{sol} , me-

$$\dot{Q}_{produzido} = \dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{ambiente}$$
$$\dot{m}(T_e - T_s) = \dot{Q}_{sol} - \alpha(\bar{T} - T_a)$$

nos as perdas térmicas para o ambiente, $\dot{Q}_{ambiente}$, conforme Equação abaixo:

Assim, afere-se que a máxima produção de energia térmica se dá quando as perdas para o meio ambiente são nulas, ou seja, $\dot{Q}_{ambiente}=0$. Para que isso seja realizado, considerando que a temperatura de entrada é igual a temperatura ambiente, $T_e=T_a$, seria necessária uma vazão tal que a temperatura de saída T_s tendesse a T_e e, portanto, a T_a . Assim, o coletor operaria com perda nula para o ambiente. O problema dessa solução ótima é que a vazão tenderia ao infinito ou, em termos práticos, a bomba operaria com máximo consumo e a temperatura de saída do coletor solar estaria praticamente à temperatura ambiente, o que, por sua vez, não possui utilidade nenhuma.

A abordagem de maximização da produção da energia produzida não é adequada. Por outro lado, a maximização de temperatura do coletor solar se mostra viável, já que um fluido a uma maior temperatura possui maior

utilidade. O problema desse raciocínio é que se avaliarmos novamente o balanço de energia, desta vez buscando a maximização de temperatura, teríamos o caso da vazão tendendo a zero, e, assim, a temperatura de saída tenderia para seu valor máximo. Essa ideia resultaria no caso de máxima perda para o meio ambiente! Essa análise, aparentemente contraditória é uma limitação da primeira lei da termodinâmica, a qual é capaz de quantificar, porém, não é capaz de qualificar as fontes de energia. Diante disso, uma nova questão emerge: **seria possível melhorar essa abordagem?**

A segunda lei da termodinâmica pode ser utilizada em conjunto com a primeira para analisar termodinamicamente tanto a quantidade quanto a qualidade das fontes de energia. Nesse sentido, as contribuições científicas focadas na otimização termodinâmica de coletores solares se baseiam na minimização de irreversibilidades geradas no processo, ou minimização da geração de entropia, ou ainda, na maximização de exergia. A exergia é definida como o máximo trabalho teórico útil que pode ser obtido se um sistema é levado ao equilíbrio com o ambiente de tal maneira que o sistema interage somente com o ambiente. O balanço de exergia é um conceito que complementa o balanço de energia com o balanço de entropia, e descreve a energia útil de uma dada fonte de calor com base na eficiência de Carnot. A eficiência de Carnot $(1-T_{ref}/T_{fonte})$, ao contrário da eficiência energética, leva em consideração a temperatura da fonte de calor T_{fonte} em relação a uma dada temperatura de

referência. O balanço de exergia considera a temperatura ambiente T_a como temperatura de referência, já que, em termos práticos, os processos industriais rejeitarão calor para o ambiente. Para o caso de um coletor solar, o balanço em regime permanente é dado por:

$$\dot{Q}_{produzido} \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) = \dot{Q}_{sol} \left(1 - \frac{T_a}{T_{sol}}\right) - \dot{Q}_{ambiente} \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) - \dot{X}_{destruida}$$

É evidente que o balanço de exergia não é conservativo, já que a equação acima possui um termo de destruição que determina a energia útil dissipada sem gerar qualquer trabalho útil. Aplicando-se o balanço de exergia ao caso da máxima transferência de energia, ou máxima vazão, conclui-se que a exergia produzida e a exergia perdida para o ambiente seriam nulas, pois tanto T_s tenderiam para T_a , e o termo da eficiência de Carnot seria zero. Além disso, conclui-se também que a exergia do sol seria completamente destruída, uma vez que a irradiação solar emitida à temperatura T_{sol} seria matematicamente transformada em um escoamento de massa infinito à temperatura ambiente, isto é, com capacidade nula de geração de trabalho útil.

Note que a irradiação solar é de alta qualidade, pois foi emitida pelo sol que está a uma altíssima temperatura de $T_{sol}=5505$ °C. Portanto, tal fonte de energia poderia ser utilizada idealmente para quaisquer utilidades. Entretanto, na abordagem de maximização da energia no coletor solar a irradiação seria completamente transformada em energia interna do fluido de trabalho, porém à temperatura ambiente. O resultado seria a destruição completa da exergia proveniente da irradiação solar pois um fluido em equilíbrio térmico com o ambiente não possui capacidade de gerar trabalho útil.

Portanto, a abordagem da otimização

por exergia amplia a perspectiva para avaliar sistemas de energia. O problema dessa abordagem é que as contribuições científicas na área tipicamente consideram os processos em regime permanente. A falta de uma modelagem dinâmica é crítica para o caso de coletores solares inerentemente intermitentes e dinâmicos. Ademais, contribuições que desenvolvem controle baseado em exergia são escassas. Foram encontrados apenas três trabalhos de revisão na área, sendo que desses apenas um *paper* integrou o controle preditivo baseado em exergia. Por isso, o objetivo do artigo é integrar o conceito de exergia em uma estrutura de controle hierárquico para controle do coletor solar ACUREX.

Resultados

A modelagem considera modelos baseados no balanço de massa e energia térmica do campo solar considerando, também, o balanço de energia mecânica de escoamento e perda de carga nas tubulações para o avaliar o impacto do consumo de energia elétrica da bomba. A estrutura de controle hierárquico empregado possui uma camada de otimização e uma camada de controle de processo. Na camada de otimização são utilizados os balanços de massa e energia estáticos, isto é, sem considerar a dinâmica da planta. Já na camada de controle foi implementado um controlador preditivo não linear do tipo *Practical Non-linear Model Predictive Controller*. Esse controlador utiliza os modelos não lineares da planta a fim de realizar uma linearização a cada passo de execução e, com isso, utilizar o conceito de MPC linear clássico. Isso evita a solução do problema de otimização com modelos não lineares.

Foram analisadas cinco funções custo

na camada de otimização: o balanço de energia térmica do coletor (E_c), o balanço de energia total (E) que subtrai a energia consumida pela bomba, a temperatura de saída (T_{max}), o balanço de exergia térmica do coletor (X_c) e, por fim, o (5) balanço de exergia total (X). A camada de otimização utiliza o solver não linear *fmincon* para buscar um ponto de operação ótimo considerando o estado medido da planta a cada 5 minutos. O solver também considera restrições de temperatura de saída ($T < 290$) e de vazão ($2 < q < 12$ m³/s). A Figura 1 apresenta os resultados.

A abordagem da otimização da produção de energia térmica E_c (linha azul contínua) produz o resultado discutido anteriormente, isto é, busca a temperatura mínima e a vazão máxima conforme figuras a e b, respectivamente. Note que a temperatura ótima de saída aumenta proporcionalmente com a irradiação porque a vazão satura em seu limite superior. O caso de energia total (E) considera potência gasta na bomba no balanço de energia. Pode-se ver, na linha laranja contínua, que tanto o perfil de vazão quanto o perfil de

temperatura alteram. A diferença mais evidente é o perfil suave da vazão com irradiações baixas até a saturação que reflete em uma pequena diferença de temperaturas de saídas com $I < 500$ W/m².

Para o caso da maximização da temperatura de saída T_{max} (linha amarela contínua) temos uma vazão mínima até aproximadamente irradiação de 600 W/m², onde a restrição de temperatura de saída máxima é alcançada. Assim, a vazão deve aumentar proporcionalmente com a irradiação para garantir a restrição superior da temperatura de saída.

Para o caso da otimização da exergia do coletor X_c (linha roxa contínua) temos um híbrido entre as abordagens anteriores. Até em uma irradiação de 500 W/m², os pontos de operação ótimos são tais que coincidem com E_c (linha azul contínua), isto é, vazão máxima e temperatura mínima. Já a partir de $I > 500$ W/m², os pontos ótimos de vazão diminuem drasticamente e as temperaturas de saída aumentam até alcançarem a restrição superior de temperatura, coincidindo com T_{max} (linha amarela contínua). Esta é uma solução que

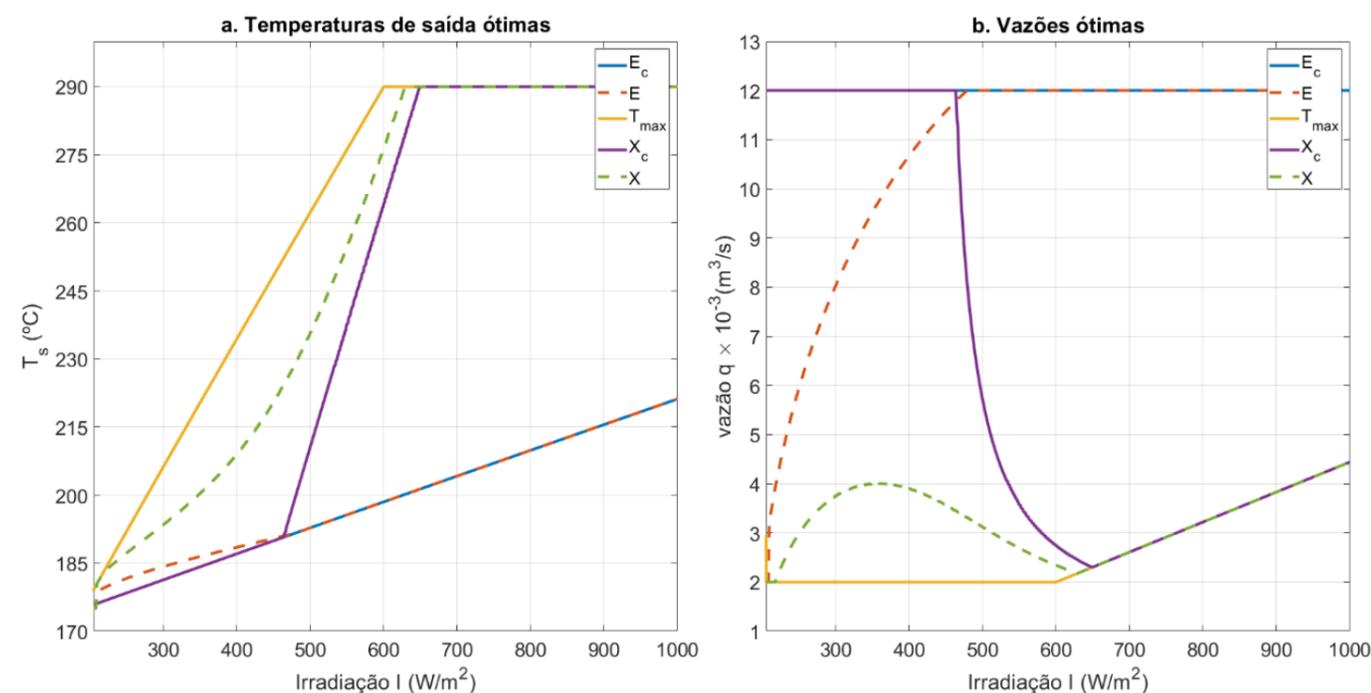


Fig. 1: Mapas de pontos ótimos de operação. (a) Temperatura vs Irradiação Solar (b) Vazão vs Irradiação Solar

concilia a qualidade da fonte de energia com a qualidade da energia produzida, isto é, irradiação solar de baixa potência gerando uma energia térmica de baixa temperatura/qualidade e vice-versa. Finalmente, a linha pontilhada verde descreve a otimização de exergia total (X) quando se desconta a potência elétrica gasta pela bomba. Nesse cenário, a energia elétrica gasta pela bomba é economizada/reduzida para o caso de irradiação solar baixa ($I < 600$). O resultado disso é um perfil de vazão mais baixo e suave. Observe que as

temperaturas de saída ótimas para este caso ficam entre a abordagem de Xc (linha roxa) e Tmax (linha amarela contínua).

As diferenças das abordagens na otimização estática são evidentes, mas tais vantagens se manteriam caso a intermitência e a dinâmica da planta fossem consideradas na simulação? Para responder essa questão, os resultados da camada de otimização foram enviados como *set-points* para a camada de controle em uma estrutura hierárquica. O controlador implementado considera o caso nomi-

nal, isto é, o modelo da planta e o modelo do controlador são idênticos. Além disso, o tempo de amostragem do PNMPC é de 15 segundos. A figura 2 apresenta as simulações considerando as maximizações da energia total (E), da temperatura de saída (Tmax) e exergia total (X).

A figura 2.a representa as entradas consideradas, isto é, os perfis de irradiação, temperatura de entrada e temperatura ambiente. Salienta-se que todas as entradas utilizadas foram obtidas de dados reais de operação. As figuras 2.b, 2.c, e 2.d representam, respectivamente, os resultados do controle hierárquico com a otimização de E, Tmax, e X. Veja que os perfis de temperatura desejada (linha pontilhada vermelha) mudam, resultando em diferentes perfis de temperatura de saída (linha preta) e vazão (linha amarela).

Todos os controladores são capazes de seguir referência e rejeitar perturbações. A maximização de E gera um perfil de temperatura mais baixo e vazões próximas à saturação. A maximização de Tmax gera um perfil de temperatura próximo à saturação e referência que não são adequadamente seguidas em baixas irradiâncias, tanto na partida quanto no desligamento da planta. A maximização de X gera referências de temperatura em baixas irradiâncias, os quais o controle PNMPC é capaz de seguir. No caso de irradiâncias altas, o controlador baseado em exergia satura na temperatura máxima do coletor tal como ocorre no controle de Tmax. A Tabela 1 resume alguns índices de desempenho dos três

controladores.

Onde E_p é a energia líquida total produzida, X_p a exergia líquida total produzida, $WP1$ é a potência total utilizada pela bomba, ηE é a eficiência energética, ηX é a eficiência exergética e IEA é a integral do erro absoluto entre a referência e a temperatura de saída ao longo do dia de produção.

Os resultados na Tabela 1 indicam que o controlador proposto, baseado em exergia (X), obtém a maior produção de X_p , seguido de perto pela maximização da temperatura de saída (Tmax). A maximização da energia (E) produzida possui a pior produção de X_p e usa quase três vezes mais $WP1$ que os outros casos. Apesar de ter a melhor ηE , baseada na primeira lei da termodinâmica, a abordagem de otimização da produção de energia não é recomendável uma vez que ela produz a menor X_p . Conclui-se, portanto, que maximizando a energia apresenta o pior resultado com base na segunda lei da termodinâmica.

Conclusões

Dito isso, é possível concluir que o controle hierárquico proposto, baseado em exergia, é capaz de responder satisfatoriamente ao seguimento de referência, rejeição de perturbação e maximização da produção de energia útil, considerando a intermitência do processo solar, as restrições operacionais e o gasto energético da bomba. Pode-se aferir que a abordagem do controle hierárquico buscando maximizar a energia produzida é insuficiente

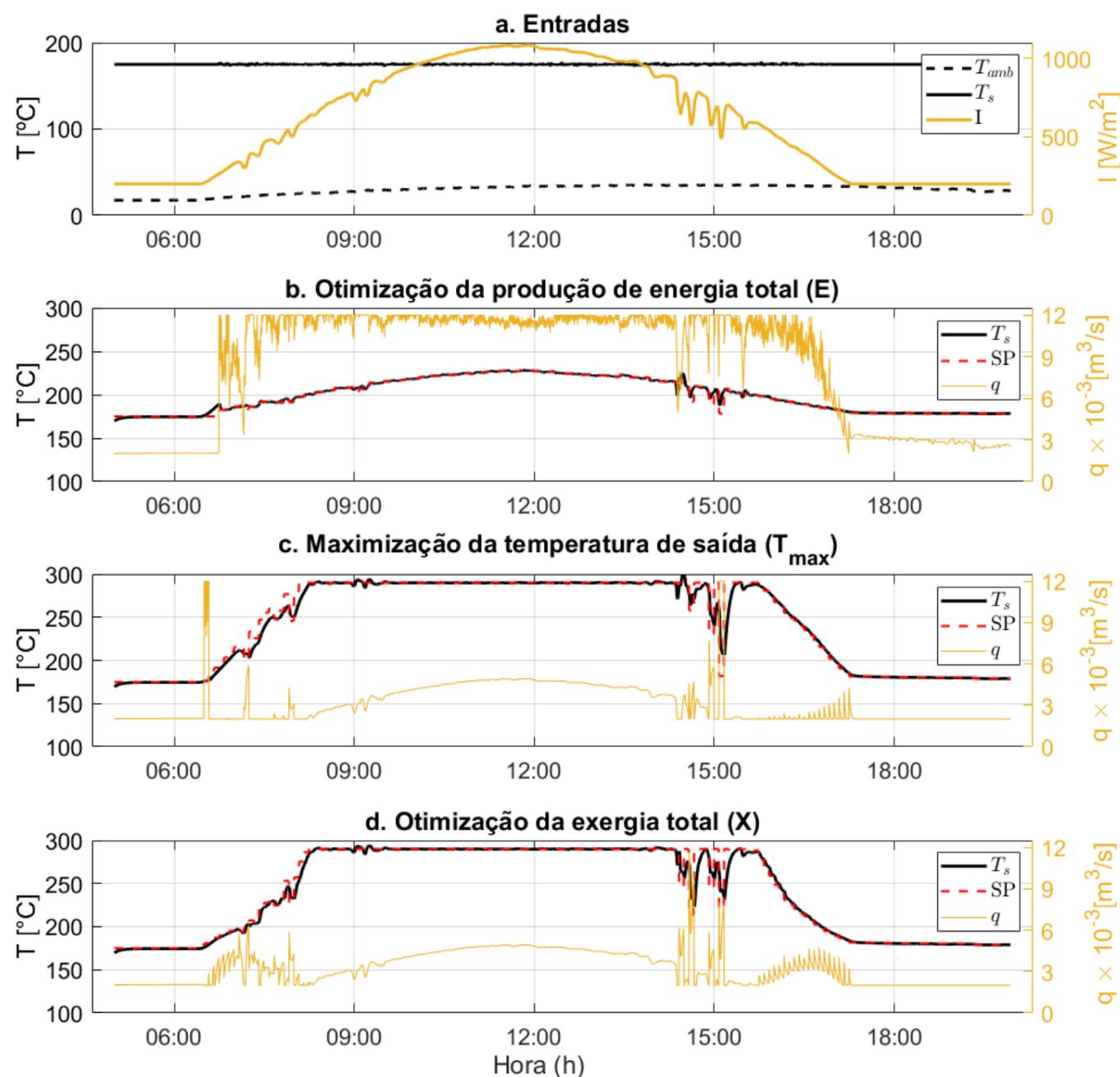


Fig. 2: Resultados do controle hierárquico. (a) Energia (b) Temperatura máxima (c) Exergia.

Tabela 1: Resultados das simulações.

Case	E_p (MJ)	X_p (MJ)	$WP1$ (MJ)	ηE	ηX	IEA ($^{\circ}C \min$)
1. E	28823	9745	440	0.292	0.103	3606
2. T_{max}	27902	10778	158	0.280	0.110	10464
3. X	28029	10787	166	0.282	0.110	9131



Diogo e o Prof. Carlos Bordons na frente da planta piloto de coletores Fresnell da US.

para aumentar a produção de energia útil, conforme a segunda lei da termodinâmica. O controle baseado em exergia possui um ganho de produção pequeno se compararmos com a abordagem da maximização da temperatura de saída. Essa última se apresenta como uma estratégia quase ótima para o caso específico de ACUREX. Todavia, esse resultado quase ótimo não pode ser generalizado a outros coletores solares por concentração. Assim, as principais vantagens do controle hierárquico proposto é que ele possui a performance mais favorável considerando ambas as leis da termodinâmica. Ademais, o controle hierárquico baseado em exergia pode ser generalizado e aplicado a qualquer coletor solar, proporcionando, assim, a melhor performance conforme a segunda lei.

O resultado desta pesquisa foi publicado na revista Energy.

Diogo Ortiz Machado, Gustavo Artur Andrade, Julio Elias Normey-Rico, Carlos Bordons, Optimal operation of Concentrating Solar Collector fields using exergy-based hierarchical control, Energy, Volume 239, Part E, 2022, 122462, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122462>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221027110>)

O trabalho foi fruto do Programa de Internacionalização – PrInt/UFSC/PPGEAS - Transformação Digital: Indústria e Serviços 4.0 que possibilitou ao doutorando a realização de seu intercâmbio na Universidade de Sevilla – Espanha. ■



Diogo na porta da Escuela Superior de Ingenieria de la US.

Autor: Prof. Daniel J. Pagano

Sistemas de geração distribuída

Desde início do ano 2000, a capacidade de geração de energia renovável passou de 700 GW para mais de 2.700 GW em 2021 [1]. Embora os sistemas hidrelétricos também possam ser considerados sistemas de energia renovável este crescimento é principalmente o resultado da capacidade de geração fotovoltaica (PV) e das turbinas eólicas. Neste período, estas duas tecnologias conjuntas conseguiram reduzir os custos de energia significativamente e começaram a ser muito competitivas, com turbinas eólicas de mais de 10 MW e usinas fotovoltaicas com capacidades de megawatts até gigawatts [1].

Por outro lado, os sistemas de distribuição de energia elétrica estão sendo atualmente redefinidos em função (i) da entrada das novas fontes de energia renovável (solar, eólica, etc.) e a sua integração ao sistema de transmissão principal (*Grid*); (ii) da necessidade de ter sistemas de transmissão e gerenciamento da energia elétrica cada vez mais flexíveis e confiáveis, acompanhando as demandas do mercado; (iii) da redução de custos energéticos otimizando as operações de geração, transmissão e consumo em conjunto com a minimização de perdas energéticas. Apesar da redução dos custos dos sistemas de geração de energia renovável (fotovoltaica, eólica, etc.), o desconhecimento de como esses equipamentos interagem dinamicamente com outros sistemas nas microrredes, com as instalações do consumidor e com a rede principal se torna uma barreira para sua utilização em larga escala. Problemas de estabilidade e surgimento de frequências sub-harmônicas são fre-

quentemente reportados nas microrredes. Além disso, as tecnologias para instalações elétricas comerciais, residenciais e remotas estão, também, sofrendo mudanças importantes e criando novos desafios para os profissionais da área

Nos atuais sistemas de distribuição de energia elétrica, a rede (*grid*) opera principalmente com corrente alternada de frequência (50Hz ou 60 Hz) e tensão (110v, 240v) controladas. Técnicas de controle convencional são aplicadas a geradores síncronos que apresentam uma grande inércia onde (i) um regulador automático controla a tensão e (ii) um regulador de velocidade controla a frequência. A energia primária, por exemplo, provem, por exemplo, de uma central de geração termoelétrica (usina a vapor ou de uma turbina a gás). Na rede principal, grandes unidades geradoras são interligadas e se compensam em função de variações de carga e da disponibilidade de energia no sistema. A frequência é controlada em uma faixa muito estreita e um regulador automático controla a tensão para manter o fluxo de energia na rede.

Do ponto de vista de controle, as dinâmicas envolvidas no controle de uma rede elétrica convencional, composta por geradores síncronos e cargas, são tipicamente de baixas frequências (da ordem de Hz), i.e. são dinâmicas relativamente lentas. Em contraposição, nas novas redes de distribuição (microrredes) onde se utilizam conversores de eletrônica de potência (inversores, conversores CC-CC, etc.) e novas estruturas de controladores que operam com dinâmicas de frequência da ordem de Khz, a operação e a esta-

bilidade da rede elétrica devem ser estudadas com um maior cuidado dado que os diferentes conversores podem interagir criando problemas de estabilidade e geração de sub-harmônicas nas redes.

Energias eólica e fotovoltaica

A geração de energia eólica envolve um gerador elétrico rotatório com tensão e frequência de corrente alternada (CA) que variam para transformar a energia do vento através das pás da turbina eólica. A energia fotovoltaica usa uma tensão CC (corrente contínua) variável para produzir a máxima quantidade de energia. Entre eles está o conversor de energia, onde demandas como alta confiabilidade, alta eficiência, baixo custo e endereçamento de questões ambientais são características importantes.

Uma observação interessante é que os atuais conversores/controladores de energia devem operar por 25 a 30 anos, resultando em mais de 120.000 horas de operação [1]. Portanto devem ser robustos e confiáveis. Em geral, os sistemas de conversão de energia não têm apenas um controlador, mas frequentemente adotam uma estrutura em cascata para controlar a corrente e a tensão, com "drivers" rápidos que incluem a sincronização dos sinais elétricos com a rede principal através de sistemas *Phase Lock Loop* - PLL. Os controladores mais lentos então tratam do controle da potência ativa e reativa, realizando o seguimento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT), bem como outras características exigidas pela rede e pelos geradores de energia que estão sendo controlados. No caso das turbinas eólicas atuais, as potências costumam ser superiores a 1 MW, embora já foram anunciadas turbinas com potências

de até 15 MW.

No caso da energia fotovoltaica, a conversão de energia pode ser de um único painel fotovoltaico (tipicamente de 300 W) a sistemas fotovoltaicos centralizados com potência superior a 1 MW, onde um grande número de painéis fotovoltaicos estão conectados em série e em paralelo. As instalações de baixa potência são normalmente adaptadas para linhas de distribuição de baixa tensão, enquanto para as instalações de alta potência os painéis fotovoltaicos são conectados a linhas de média tensão.

Microrredes

Microrredes são redes de energia elétrica composta de diversas fontes e cargas que podem operar com ou sem a presença da rede elétrica principal. É um novo paradigma para o sistema elétrico de potência devido à presença de conversores de eletrônica de potência ao invés das habituais máquinas síncronas com inércia muito grande. Uma das principais tendências dentro da eletrônica de potência atualmente é a aplicação de conversores de energia para a operação em microrredes, que na essência é eletrônica de potência aplicada a sistemas de distribuição de energia elétrica. Uma das vantagens das microrredes, em comparação com o sistema elétrico atual, é a presença de diversas fontes, de forma que a geração de energia é distribuída por todo o sistema, o que o torna mais confiável. A independência das microrredes com relação à rede principal é um grande atrativo, mas existem alguns problemas. Na ausência da rede principal, a estabilidade da tensão no barramento comum de uma microrrede deve ser garantida pelo seus próprios elementos. Quando a

rede elétrica principal está conectada diretamente no barramento da microrrede, a estabilidade passa a ser um problema secundário.

A Figura 1 mostra uma microrrede híbrida genérica com um barramento CC e CA. Diversas fontes e cargas estão conectadas nestes barramentos além de um conversor CA-CC que interliga estes dois barramentos. O sentido da potência de cada elemento é indicado por setas: fontes unidirecionais são amarelas; cargas são vermelhas e as setas verdes indicam elementos bidirecionais, que possuem um papel fundamental na estabilidade da tensão nos barramentos.

Este exemplo de microrrede possui algumas opções de operação, como por exemplo, os dois barramentos podem ser isolados caso o conversor CA-CC seja desligado; a rede elétrica pode estar presente no barramento CA, ou pode ser desconectada (modo ilhado). Do ponto de vista do gerenciamento da microrrede a presença da rede elétrica permite uma maior flexibilidade, pois com sua ausência

a microrrede opera com recursos finitos. Em condições ideais, todas as fontes de energia renovável devem operar no MPPT. A presença da rede elétrica conectada diretamente no barramento CA resolve a estabilidade da tensão, pois a rede elétrica funciona como uma fonte de tensão ideal, ou seja possui uma inércia infinita. No caso do barramento CC não existe esta fonte de tensão ideal conectada diretamente no seu barramento, mas na presença de um supercapacitor, o problema da estabilidade da tensão no barramento passa a ser algo trivial, dado que o efeito de um capacitor conectado no barramento de uma rede CC pode melhorar a sua estabilidade.

Um aspecto importante de uma microrrede é a questão da comunicação dos diversos elementos. De um modo geral existe um controlador central que gerencia os recursos de uma microrrede, o MGCC (*microgrid central controller*). Todas as fontes e cargas podem mandar informações básicas de consumo de potência por exemplo, para este controlador central e este controlador pode fornecer al-

guns sinais de referências para os controladores das fontes para otimizar um tipo de fonte em um determinado momento. Esta capacidade de gerenciamento deve ser usada para redes que operam com potências elevadas, redes extremamente simples e pequenas podem operar perfeitamente sem este gerenciamento.

Um dos temas mais atuais de pesquisa consiste em estudar o problema da estabilidade em microrredes CC e CA. A estabilidade da microrrede pode ser estudada através de modelos lineares (estabilidade para pequenos grandes) ou de modelos não lineares (estabilidade para grandes sinais), estes últimos permitem um estudo mais completo dos fenômenos dinâmicos aos quais estão sujeitos as variáveis associadas com os modelos da microrrede. Note que uma questão até mais básica que a estabilidade é o gerenciamento da microrrede. Não importa o tipo de rede elétrica, o princípio da conservação da energia deve ser válido e em regime permanente teremos

$$\sum P_{\text{fontes}} = \sum P_{\text{cargas}} \quad (1)$$

então caso seja necessário uma tensão muito alta no barramento comum, ou uma tensão muito baixa para satisfazer (1), não existe uma técnica de controle que possa ser usada para amenizar isto. Com excesso de geração de energia e sem carga para consumir, a tensão no barramento vai crescer e a solução é reduzir a geração, ou conectar um banco de resistências no barramento, de qualquer forma uma parcela de energia será perdida a menos que seja armazenada em sistemas de armazenamento de energia como bancos de baterias convencionais, *flow batteries*, *flywheel storage systems*, ultracapacitores, sistemas de bombeamento hidráulicos, etc. Um problema similar

ocorre com a falta de geração de energia. Estes problemas são bem mais básicos que a estabilidade que queremos analisar e verificar, logo questões como esta serão consideradas como parte do gerenciamento da microrrede e são definidas pelas condições em regime permanente. O problema da estabilidade é devido às interações dinâmicas dos dispositivos da microrrede. Neste problema, a equação (1) é satisfeita dentro da faixa de operação do sistema, mas a tensão no barramento comum pode vir a ser instável devido à dinâmica do sistema [2, 3].

Microrredes CC

Um exemplo de uma microrrede CC com diversos elementos básicos pode ser visualizada na Figura 2. Esta configuração pode ser vista como um exemplo básico de uma microrrede CC, pois contém fontes alternativas de energia (painel fotovoltaico, energia eólica), sistemas armazenadores de energia (baterias), conexão com a rede principal, além de diversas cargas. Assumindo que a maioria das cargas são eletrônicas, a presença de conversores (CC-CC, CC-CA) controlados conectados no barramento CC é significativa. O fluxo de potência dos diversos elementos que compõe esta microrrede são separados em três tipos: *i*) cargas (sempre consomem energia); *ii*) fontes renováveis (sempre fornecem energia); *iii*) armazenadores de energia (fluxo bidirecional de potência), como os conversores conectados nas baterias e o conversor CA-CC que interliga a microrrede com a rede principal, ou com uma microrrede CA. A conexão de todos estes elementos podem ser modeladas por equações diferenciais obtidas aplicando as leis de Kirchoff. Mapeando os elementos da microrrede conforme o seu papel no fluxo de potência permite modelar cada conversor de forma adequada. Por exemplo, todos os conversores

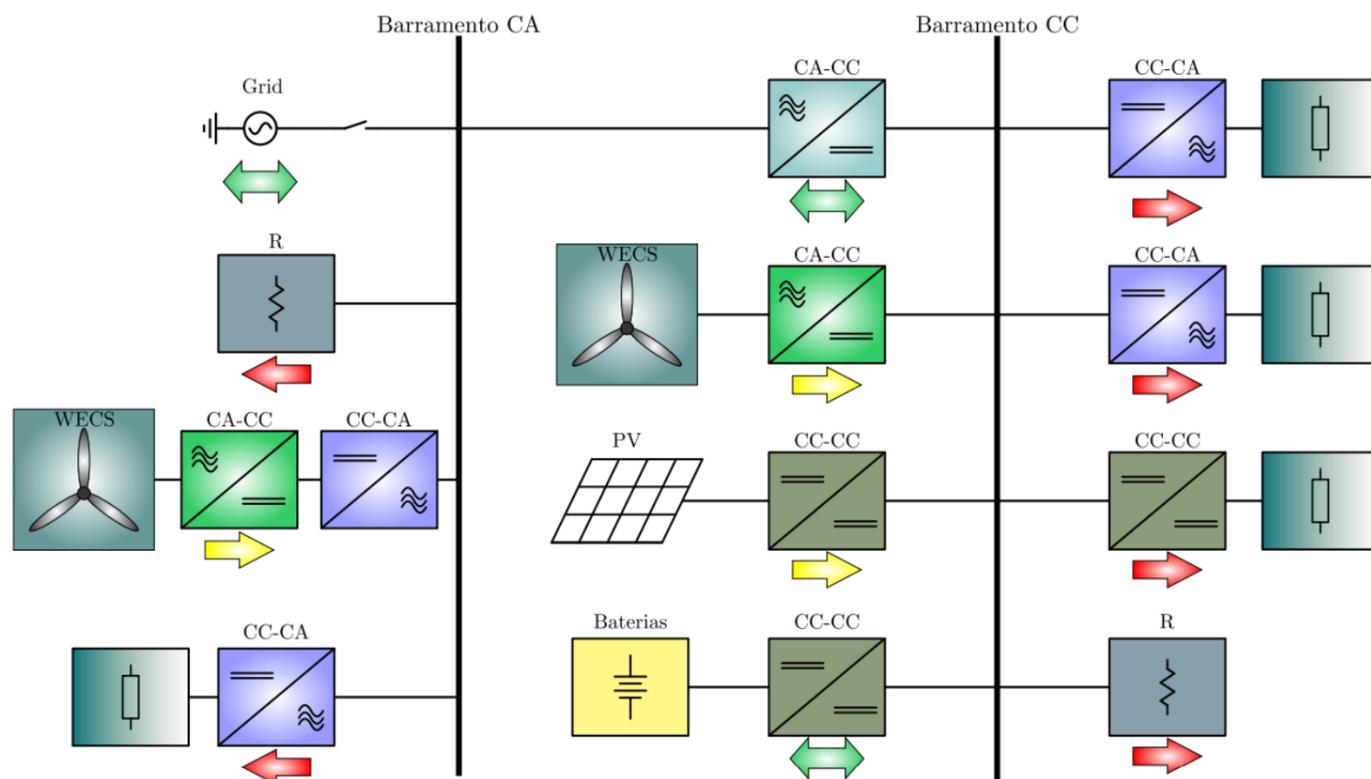


Fig. 1: Diagrama unifilar de uma microrrede de distribuição elétrica.

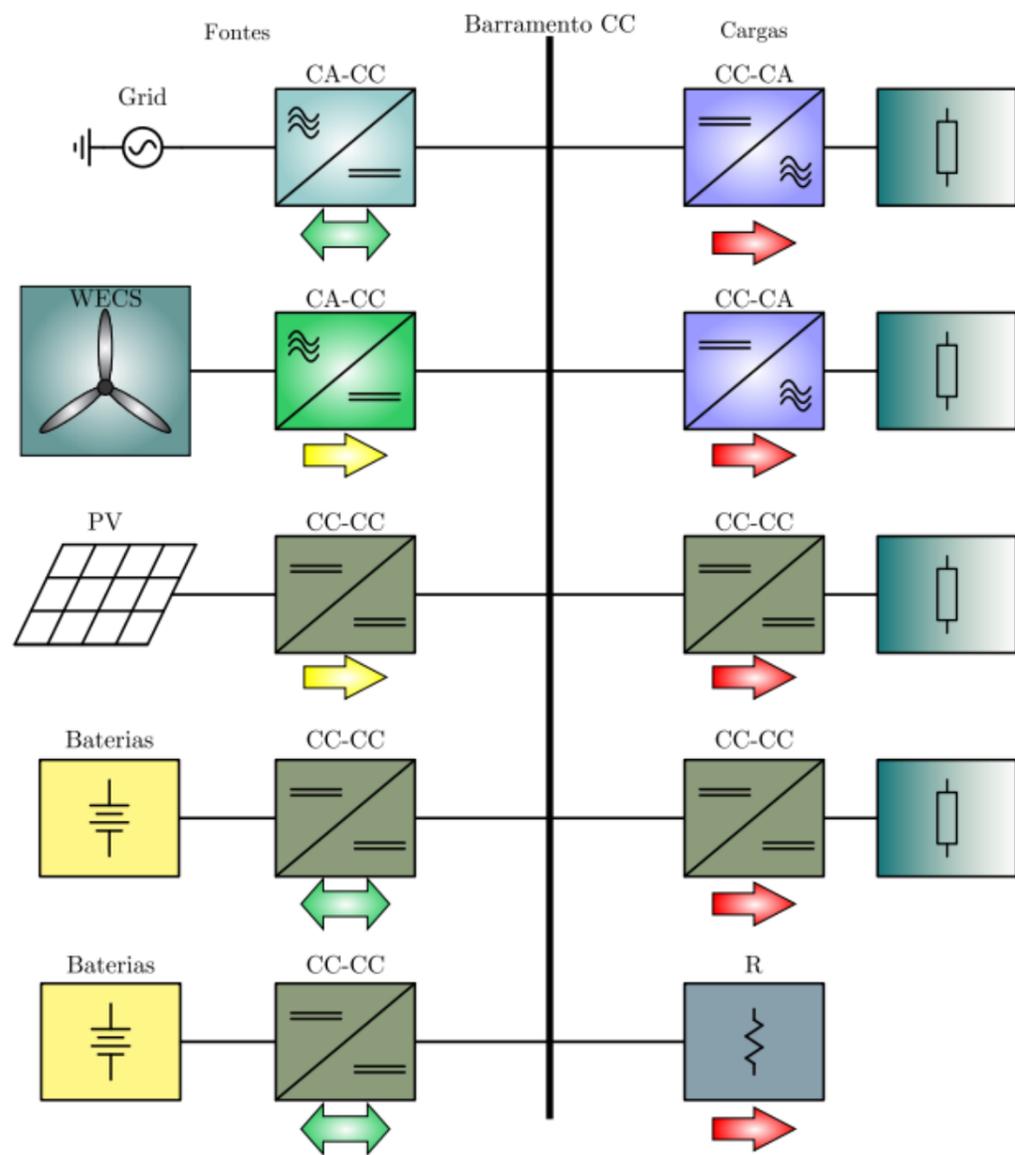


Fig. 2: Microrrede CC.

conectados no barramento que possuem um fluxo de potência bidirecionais devem atuar como fontes de tensão para garantir a estabilidade da tensão no barramento comum. As fontes renováveis e as cargas não lineares podem ser modeladas como fontes de corrente que injetam ou consomem potência constante por partes. Em uma microrrede CC a estabilidade é verificada através da tensão no barramento. No caso de um gerenciamento adequado, todas as fontes e cargas devem ser monitoradas para garantir um fluxo de potência ótimo.

Microrredes CA

Uma microrrede CA como a mostrada na Fig.

3 possui diversas similaridades com o caso CC, mas algumas pequenas diferenças que trazem problemas adicionais. A amplitude da tensão no barramento comum deve operar dentro de uma faixa definida pelo projeto da microrrede, mas a frequência também pode ser variada (em uma faixa bem restrita). Além de verificar o comportamento da amplitude e frequência da tensão no barramento, as potências ativa e reativa dos diversos elementos da microrrede devem ser monitorados para otimizar o gerenciamento do sistema. A dificuldade na análise de estabilidade para microrredes CA é o fato de serem sistemas não homogêneos, ou seja as fontes geram tensões CA.

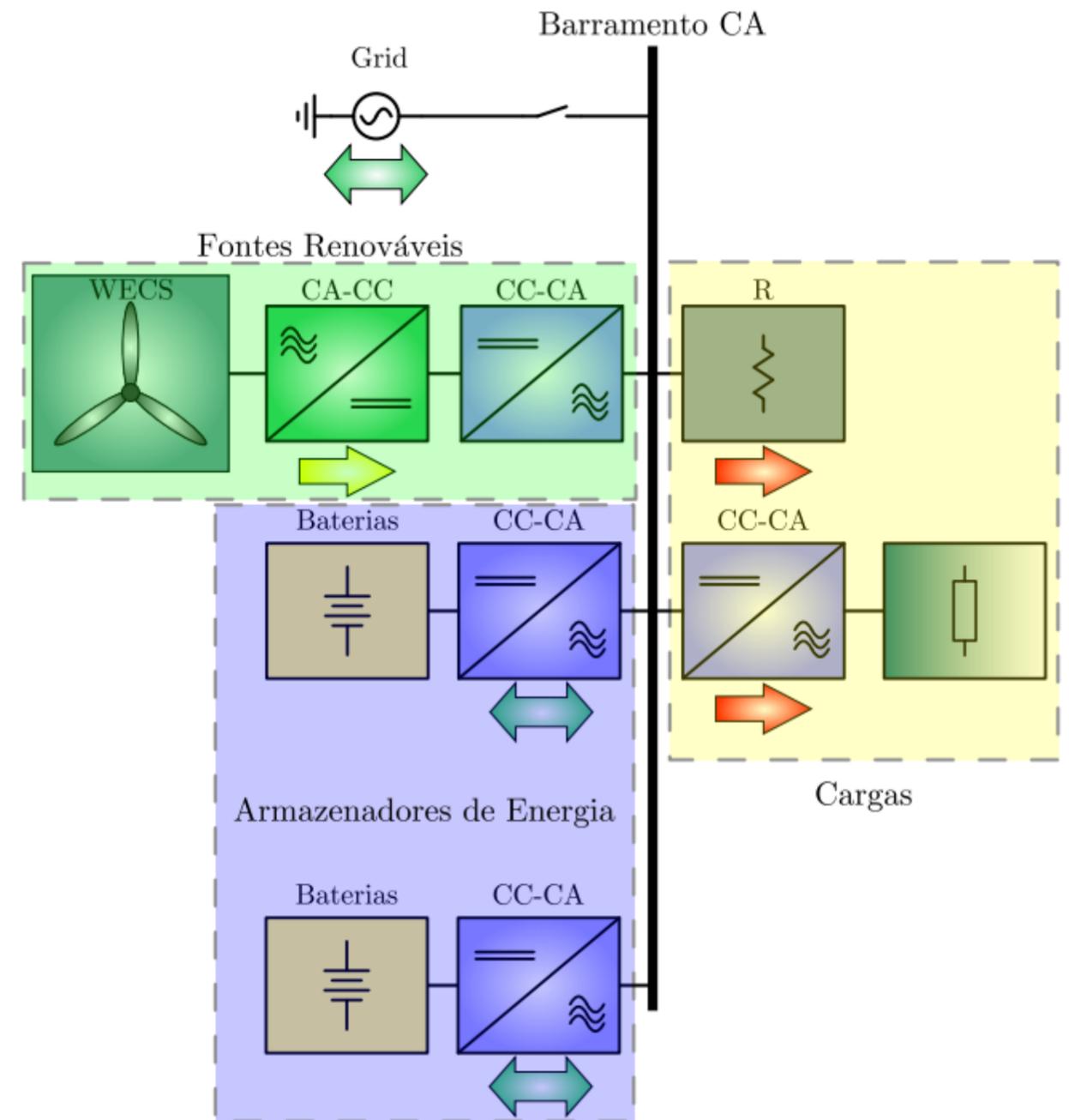


Fig. 3: Microrrede CA.

Quando se utilizam modelos lineares, não existe muita dificuldade, mas a presença de não linearidades nas equações torna o processo um tanto complexo. Uma forma de se analisar a estabilidade de microrredes CA na presença de não linearidades de forma simples é utilizar a transformada \mathcal{dq} que em condições ideais transforma todas as variáveis CA em grandezas CC. Um tema de pesquisa muito importante consiste em estudar as microrredes CA operando no modo ilhado, pois nes-

ta situação a questão da estabilidade é fundamental [4, 5]. Na presença da rede elétrica a estabilidade é um problema trivial, já que todas as cargas e fontes conectadas na rede elétrica são desacopladas devido à inércia infinita da rede principal. Na presença da rede elétrica todos os inversores podem simplesmente funcionar como fontes de corrente fornecendo potência para a microrrede.

Estabilidade das microrredes

A abordagem comum para a análise de estabi-

lidade de microrredes concentra-se na linearização do modelo de cada componente do sistema. Também são empregadas técnicas baseadas na análise de modelos de impedâncias e na aplicação do critério de estabilidade proposto por Middlebrook [2]. Técnicas de análise não lineares também são utilizadas, considerando diferentes estruturas de microrredes e modos multi-operativos e, apesar de oferecer modelos mais precisos, o número de equações aumenta consideravelmente mesmo para microrredes pequenas e, assim, aumenta a complexidade de análise do sistema. Uma forma diferente de estudar a estabilidade do sistema, consiste em desprezar a dinâmica interna de cada elemento que compõem uma microrrede, focando apenas na dinâmica da conexão entre eles. Além disso, usando técnicas de análise de bifurcações é possível estabelecer uma região de operação de energia segura e projetar mecanismos de proteção adequados para aumentar a confiabilidade e estabilidade do sistema. Para maiores detalhes sobre esta técnica vide as referências [2, 3, 4, 5].

Controle de conversores

Ao longo das últimas décadas, as metas formuladas para atingir elevados padrões de qualidade da energia gerada e transmitida, junto a necessidade de se reduzir ao máximo a dissipação de energia provocaram um crescimento muito grande de conversores CC-CC, CC-CA, entre outros, presentes na rede elétrica principal. Neste sentido, as fontes de energia renovável, como painéis fotovoltaicos (PV), turbinas eólicas (WECS), etc. são cada vez mais comuns. Todas estas fontes precisam de conversores de energia para interligar-se com a rede, ou mesmo para o seu funcionamento isolado. Com a presença de vários conversores no sistema elétrico, atuando como cargas e/ou fontes, temos um comportamento

dinâmico da rede elétrica muito diferente quando comparado com décadas atrás. A geração de energia distribuída (GD), ao invés de concentrar tudo em poucos elementos, permite uma flexibilidade muito grande para a operação do sistema elétrico. Por exemplo, nas redes de energia de CA, o nível de penetração da eletrônica de potência continua a aumentar, o que eleva significativamente o risco de falha em cascata e reduz a robustez da rede de energia. Para mitigar o impacto da implantação inevitável da eletrônica de potência, alguns conversores são controlados como fontes de tensão (voltage-source converters - VSCs). Estes conversores, denominados de *formadores de grid (grid-forming VSCs)*, participam da regulação da frequência e da tensão da rede e fornecem alguma inércia virtual para a rede. No entanto, os VSCs podem apresentar diferentes problemas de estabilidade durante estados transitórios do sistema devidos a perturbações de carga. A fim de garantir a operação estável dos VSCs são realizados estudos de estabilidade não linear aplicando as técnicas da análise de bifurcações para identificar o comportamento complexo destes dispositivos na sua conexão com a rede. Estudar este tipo de problemas de estabilidade para grandes sinais é um tema atual de pesquisa. Os algoritmos de controle de conversores são avaliados e testados por simulação, mais principalmente utilizando simuladores de tempo real com ferramentas de Hardware-in-the-loop (HIL) e, finalmente, em protótipos de laboratório.

Conclusões

Neste texto realizamos uma breve revisão sobre o panorama da pesquisa na área de sistemas de geração de energia renovável, novos sistemas de distribuição de energia elétrica (microrredes) e controle de conversores de

eletrônica de potência.

Nos próximos anos devem ocorrer importantes mudanças nos sistemas de distribuição de energia elétrica com um maior desenvolvimento das microrredes CC e CA. Estas novas redes devem incluir entre outras (i) uma maior capacidade da geração de energia renovável instalada, (ii) uma modernização da estrutura das microrredes, (iii) o predomínio dos carros elétricos considerados como cargas ou sistemas de armazenamento e (iv) um maior grau de automação nas microrredes. Outros temas muito importantes, e que não foram tratados neste artigo, são (i) o armazenamento de energia elétrica, de longo prazo, através de baterias ou outros sistemas de armazenamento; (ii) a digitalização das redes de distribuição de energia elétrica e (iii) a transmissão de energia elétrica em corrente contínua e alta tensão (*High Voltage Direct Current - HVDC*). Estas áreas de pesquisa apresentam inúmeros desafios, em particular para a área de controle e análise de sistemas dinâmicos, que deverão ser abordados nos próximos anos para tornar os sistemas de geração distribuída e distribuição elétrica por microrredes mais confiáveis, flexíveis e seguros.

Referências bibliográficas

- [1] Blaabjerg, F. Millions of units to make an energy transformation and to be controlled. IEEE Control Systems. pp. 9-13. August, 2021.
- [2] Tahim, A. P. N., Pagano, D. J., Lenz, E. and Stratosk, V. Modeling and Stability Analysis of Islanded DC Microgrids Under Droop Control. IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 30, No. 8, pp. 4597-4607, August 2015.
- [3] Lenz, E., Pagano, D. J. and Tahim, A. P. N. . Codimension-Two Bifurcation Analysis in DC Microgrids Under Droop Control. International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 26, No. 2, 2016.
- [4] Lenz, E., Pagano, D. J. and Pou, J. Bifurcation

analysis of parallel-connected voltage-source inverters with constant power loads. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, pp. 5482-5493, 2018.

[5] Lenz, E., Pagano, D. J., Ruseler, A. and Heldwein, M. Two-parameter stability analysis of resistive droop control applied to parallel-connected voltage-source inverters. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, No 4, pp. 3318-3332, December 2020.

[6] Lucas Marcillo, K., Pagano, D. J., Vaca-Benavides, D. *et al.*. Robust control of interconnected power electronic converters to enhance performance in dc distribution systems: A case of study. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, No 4, pp. 4851-4863, April 2021.

Projeto UFSCkite: aerogeradores com asas cabeadas

Autores: Prof. Marcelo De Lellis C. de Oliveira e Prof. Alexandre Trofino Neto

O projeto UFSCkite começou em 2012 com a proposta de um estudante de mestrado, Ramiro Saraiva, de estudar a tecnologia conhecida como Airborne Wind Energy (AWE), que estava sendo desenvolvida na Europa já há alguns anos. O projeto começou com perfil acadêmico, mas o tema despertou o interesse de outros alunos e a equipe aumentou rapidamente, inclusive com o ingresso do então aluno de doutorado Marcelo De Lellis no mesmo ano. Como no Brasil não havia especialistas na área, buscou-se apoio de pesquisadores europeus, em particular na TU-Delft, Holanda, uma das universidades europeias com maior protagonismo no desenvolvimento de protótipos dessa tecnologia. Foram realizadas visitas de cooperação na universidade holandesa e em pouco tempo a equipe já havia crescido ainda mais e conseguido recursos do CNPq para a construção de protótipos. Desde então foram 3 projetos aprovados no CNPq e o UFSCkite se tornou o único projeto a desenvolver a tecnologia AWE na América Latina, segundo levantamento da própria TU Delft. No final de 2021 o projeto teve uma grande exposição na mídia e empresas manifestaram interesse em investir no projeto visando transformá-lo numa empresa. As negociações estão hoje em curso.

A ideia com a tecnologia AWE é substituir as pás de um aerogerador convencional por um dispositivo capaz de se manter no ar apenas por forças aerodinâmicas (no caso de uma asa) ou aerostáticas (no caso de balão). Tal dispositivo é preso ao solo por um ou mais cabos em substituição à torre do aerogerador convencional, como ilustrado na Fig. 1.

No caso da geração em voo, o dispositivo que voa assemelha-se a uma aeronave (*drone*), com turbinas que atuam como propulsores para o pouso e decolagem, mas como geradores na maior parte do tempo em que a aeronave voa em uma trajetória circular aproximadamente perpendicular ao vento (*crosswind*). A energia elétrica gerada é transmitida à infraestrutura no solo pela parte interna do cabo. Já no caso da geração em solo, o dispositivo (asa) que voa pode ser um parapente de voo livre ou “pipa” de kitesurf, presa por um cabo que, na outra extremidade, é enrolado em um carretel no solo, conectado ao gerador. A energia elétrica é gerada à medida que a asa é levada pelo vento, desenrolando o cabo do carretel e acionando o gerador.

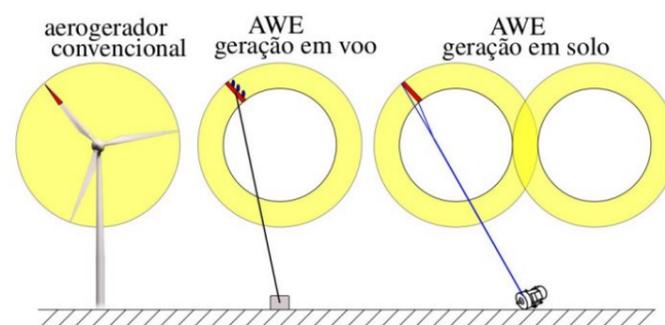


Fig. 1: Comparação entre um aerogerador convencional e as duas abordagens AWE. Adaptado de [1].

Pumping kite

No projeto UFSCkite optou-se por investigar a configuração com geração no solo, devido a questões de custo e complexidade no desenvolvimento do protótipo que se almejava. Essa configuração é comumente conhecida por pumping kite (PK) tendo em vista o comportamento cíclico mostrado na Fig. 2. Na fase de geração a asa voa no crosswind, em uma traje-

tória similar ao símbolo de infinito (∞), como vista a partir da chamada unidade de solo, que abriga o gerador elétrico. À medida que a asa é levada pelo vento, o produto entre a tração do cabo e a velocidade de desenrolamento caracteriza a potência mecânica que é fornecida ao gerador elétrico, produzindo eletricidade. Após cerca de dois minutos em geração, antes que se esgote a quantidade de cabo enrolado no carretel, a asa é configurada para uma condição de baixa eficiência aerodinâmica, reduzindo drasticamente a tração do cabo, que então passa a ser recolhido rapidamente, com o gerador funcionando como motor, consumindo uma pequena parcela da energia gerada. Assim que o comprimento de cabo original é atingido, o enrolamento cessa, a asa é reconfigurada para a condição de alta eficiência aerodinâmica e uma nova fase de geração é iniciada, completando o ciclo. Na Fig. 1 também é indicada a presença de uma unidade de voo, interconectando o cabo de tração do carretel à asa, e que possui servomotores responsáveis por manipular os dois cabos de controle de voo da asa (conectados na parte “de

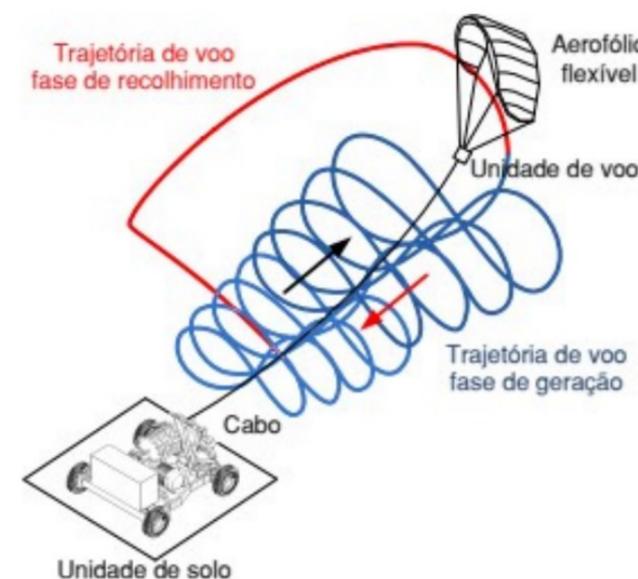


Fig. 2: Ciclo de operação de um pumping kite. Fonte: [2].

trás”, bordo de fuga, da asa), como o faz um piloto de parapente.

Pesquisa de Base

Os primeiros dois anos do projeto UFSCkite, de 2012 a 2014, foram dedicados à pesquisa de base, em que foi realizado um profundo estudo da literatura com o objetivo de compreender o estado-da-arte e os principais desafios que se mostravam à época. Com base nesse estudo foi implementado um modelo de simulação (modelo “ponto de massa”) de um PK que permitiu o desenvolvimento de estratégias mais robustas e simples para o voo da asa na fase de geração [3]. Optou-se por um controle em cascata, conforme diagrama de blocos da Fig. 3, em que na malha externa é gerada uma referência para a direção em que a asa deve voar (ξ_{ref}), enquanto na malha interna tal referência é perseguida por meio da atuação no comprimento relativo entre os dois cabos de comando (u). Para a malha externa (geração de trajetória) foram propostas duas estratégias: a lemniscata de Bernoulli (estratégia contínua) e os pontos atratores (estratégia discreta). Já para a malha interna as opções desenvolvidas foram um controlador proporcional e um controlador por realimentação linearizante.

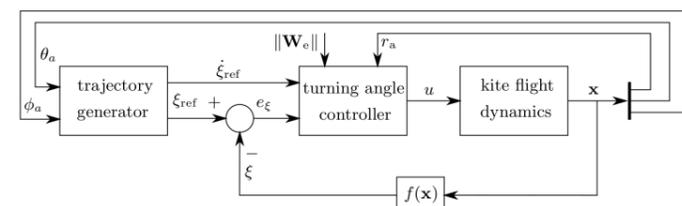


Fig. 3: Controle de voo com malhas em cascata. Fonte: [3].

Utilizando o mesmo modelo de simulação de [3], foram estudadas trajetórias para a fase de recolhimento que apresentassem um

equilíbrio entre eficiência energética e robustez da manobra, de modo a evitar que o kite inflável perdesse o seu formato adequado (se “torcesse”) durante a manobra [4]. Motivada por esses resultados preliminares, em 2013, a equipe elaborou duas propostas para editais do CNPq visando a um desenvolvimento incremental do protótipo, separando a operação do PK em dois desafios independentes: controlar o voo (Chamada Universal) e gerar energia controlando o desenrolamento do cabo (Chamada específica em energia eólica).

Validação do controle de voo com protótipo

Tendo o projeto UFSCkite sido contemplado com recursos da chamada CNPq/Universal, no ano de 2014 iniciaram-se os esforços de projeto, construção e montagem de um protótipo para validação, em campo, do controle de voo proposto na etapa anterior. A partir desse momento a equipe de projeto se expandiu, passando a contar com bolsistas de iniciação científica, múltiplos mestrandos e doutorandos. O leque de atividades da equipe se ampliou também, passando a contemplar não somente as tarefas de modelagem matemática, projeto de controladores, programação e simulação, mas também as áreas de instrumentação, eletrônica embarcada, aerodinâmica, redes de comunicação e sistemas supervisórios (SCADA). A fabricação e montagem da estrutura mecânica do protótipo foi feita junto a uma empresa contratada. Na Fig. 4 é retratado o protótipo em operação em campo. Trata-se basicamente de uma base giroscópica que permite movimentos da asa paralelos ao solo (ângulo azimutal, φ) na direção da abóboda celeste (ângulo polar, θ), e movimentos combinados. Foram testados comprimentos de ca-

bo de 22 e 44 metros. Para ambos os casos atingiu-se o objetivo de voo automático (sem necessidade de piloto), por meio da estratégia de pontos atratores combinada com o controle proporcional. Essa estratégia resultou em elevada robustez paramétrica e baixo custo computacional, compatível com o período de amostragem de 100 ms, acima do qual o controle se deteriora devido à rápida dinâmica de voo causado pelo pequeno comprimento de cabo. O resultado de um desses testes pode ser visto na Fig. 5, em que são visíveis três órbitas em torno dos pontos atratores (círculos vermelhos). Nota-se que a trajetória de voo (linha azul) resultou em uma aproximação da lemniscata de Bernoulli. A inclinação da trajetória no semieixo maior (horizontal) no sentido horário deu-se devido a um desalinhamento do ponto médio entre os atratores com a direção predominante do vento, ressaltando a importância de um sensor (anemômetro) que fornecesse tal informação. Vídeos dos testes de campo realizados nesse período podem ser vistos no canal “UFSCkite” do YouTube: <https://www.youtube.com/channel/UCUiIKg7KZcMLKLXhibkswxQ>.

Ao final deste período, em 2016, foi realizado um estudo de viabilidade econômica



Fig. 4: Protótipo para validação do controle de voo em teste de campo. Fonte: arquivo UFSCkite.

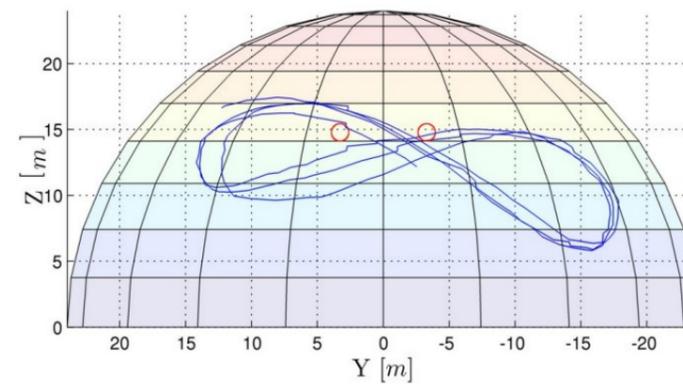


Fig. 5: Exemplo de trajetória de voo com pontos atratores obtida em teste de campo. Fonte: arquivo UFSCkite.

da tecnologia AWE com PKs de 2 MW, comparando-os com aerogeradores convencionais (WTs) de mesma potência [5]. Em síntese, com base em estimativas de custo consideradas altas para os componentes dos PKs, concluiu-se que a taxa interna de retorno de um parque eólico com 21 unidades de PKs é multiplicada por 3 em comparação ao mesmo parque com 21 WTs. Para parques já existentes, a título de exemplo, a opção de inserir 13 unidades de PKs entre os aerogeradores existentes – dessa forma aumentando a densidade do parque sem causar interferência na operação das turbinas, haja vista que os PKs operam em uma altitude maior que as pás dos rotores –, resultaria em uma taxa interna de retorno dobrada (100% maior). Um exemplo do arranjo de parques eólicos híbridos, que integram a tecnologia AWE à convencional, é ilustrada

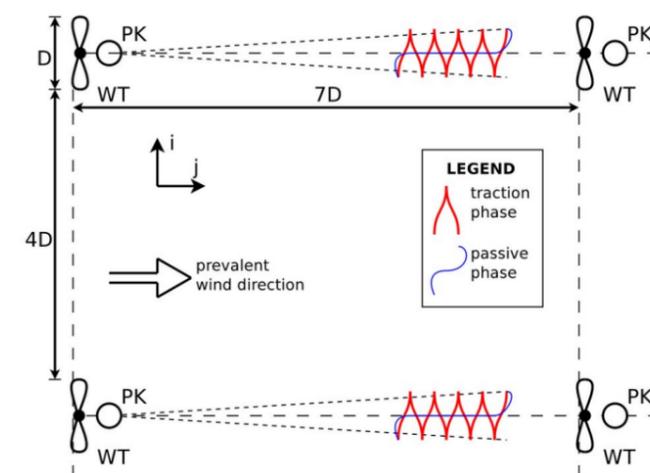


Fig. 6: Arranjo de aerogeradores convencionais (WTs) e pumping kites (PKs) em um parque eólico híbrido. Fonte: [5].

na Fig. 6, em que a traction phase e passive phase significam as fases de geração e recolhimento, respectivamente.

Construção do protótipo completo de PK

Tendo sido validado o controle de voo, deu-se início à construção de um novo protótipo da unidade de voo, dessa vez apto a de fato voar próximo à asa, permitindo o desenrolamento do cabo e, portanto, a geração elétrica. O principal requisito nesse projeto foi o peso da unidade: quanto menor, melhor torna-se a eficiência do PK. Foi projetada uma unidade de 7 kg, ilustrada na Fig. 7. Nela pode-se observar os principais componentes, com destaque para os dois conjuntos de servomotor, redutor mecânico e encoder rotativo, representados pelos cilindros na horizontal. Na extremidade esquerda os redutores acionam polias (alojadas entre duas chapas metálicas) responsáveis pelos comandos de guinada (comprimento relativo entre cabos) e arfagem (variação igual no comprimento de cada cabo). Enquanto o primeiro comando permite alterar a trajetória de voo, o segundo altera a eficiência aerodinâmica da asa. Na fase de recolhimento essa eficiência é deliberadamente reduzida para que a asa possa ser recolhida rapidamente com apenas um pequeno gasto energético. À esquerda das chapas (ou seja, na parte da “frente” da unidade de voo) está um pack de baterias, dimensionado para assegurar uma autonomia mínima na operação do sistema. Durante a operação do PK, tal pack seria continuamente carregado por uma pequena turbina de eixo horizontal (12 cm de diâmetro), responsável por gerar os cerca de 60 W de consumo estimados para a unidade de voo. Com isso evitam-se os problemas associados ao fornecimento de alimentação elé-

trica por dentro do cabo de tração. Duas células de carga foram previstas para a medição da tração do cabo in loco: na operação em solo (estrutura giroscópica da Fig. 7) seria utilizada apenas a célula de carga superior (formato do número “5”), enquanto para a operação em voo apenas a célula de baixo (formato cilíndrico) seria utilizada. Convém ainda mencionar o compartimento para o paraquedas, na parte superior traseira da unidade de voo: no caso de rompimento do cabo de tração e consequente perda de manobrabilidade da asa, o paraquedas é automaticamente liberado para frear a unidade (e consequentemente a asa), reduzindo danos decorrentes do impacto com o solo.

O projeto UFSCkite também foi contemplado no edital do CNPq específico para

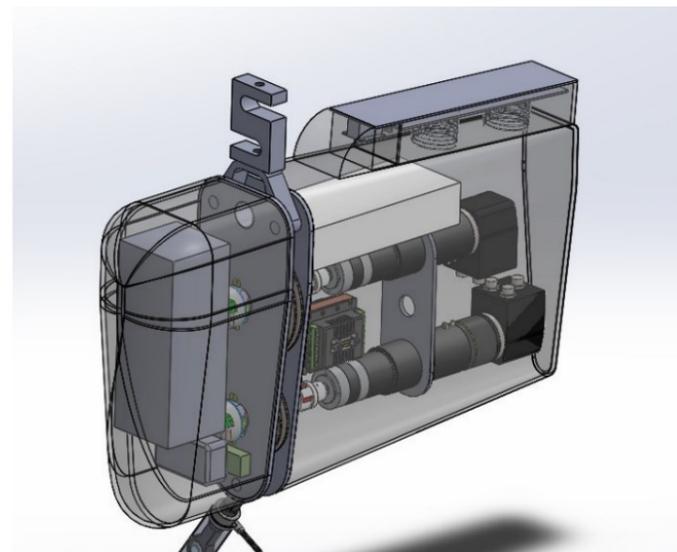


Fig. 7: Projeto da unidade de voo para operação no ar conectada à asa, para geração elétrica. Fonte: arquivo UFSCkite.

energia eólica, de tal modo que, a partir de 2016, com a conclusão da validação do controle de voo, intensificaram-se os trabalhos no desenvolvimento de uma unidade de solo. Conforme mostrado na Fig. 8, tal unidade consiste basicamente de um reboque veicular que comporta uma máquina elétrica de 12 kW (gerador/motor) conectada ao carretel por meio de um redutor mecânico em “L”, para

fins de compactação do protótipo. A máquina é controlada por meio de um inversor de frequência abrigado em um painel elétrico, juntamente com um microcomputador embarcado (BeagleBone) e outros dispositivos eletrônicos e de proteção elétrica, tais como fontes, fusíveis, disjuntores e relés.

Controle de tração

Estudos da equipe do UFSCkite demonstraram que a velocidade ótima de desenrolamento depende fortemente da velocidade do vento. Portanto, caso a velocidade do vento aumente rapidamente sem que tal mudança se reflita em um rápido ajuste na velocidade de desenrolamento, a tração do cabo aumenta com o quadrado da velocidade do vento, podendo exceder os limites estruturais do aerogerador AWE. No caso de uma redução na velocidade do vento sem o proporcional ajuste na velocidade de desenrolamento, a tração pode se reduzir a ponto de o cabo tornar-se “frouxo”, acarretando a perda de controle sobre a asa. Com base nessas preocupações, conforme a Fig. 9, em [6] propôs-se uma estrutura de controle de tração (T) que, na sua malha externa, gera uma referência (T_{ref}) com base na diferença entre a velocidade ótima de desenrolamento (cerca de 1/3 da velocidade do



Fig. 8: Unidade de solo de 12 kW desenvolvida no projeto UFSCkite. Fonte: arquivo UFSCkite.

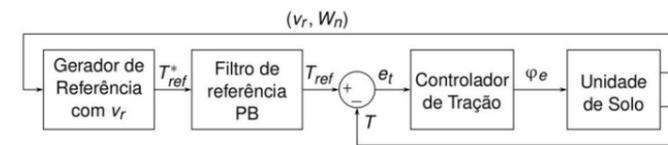


Fig. 9: Controle de tração no cabo com manipulação do torque elétrico. Fonte: [6].

vento na direção do cabo) e a velocidade atual; se esta diferença for positiva, o gerador diminui T_{ref} por meio de um controlador PI, e vice-versa. Já na malha interna a referência de tração é perseguida por meio de um controlador por realimentação de estados (tração e velocidade da máquina), gerando uma referência de torque elétrico (φ_e) que é enviada ao inversor de frequência. Outra opção de malha externa foi proposta utilizando-se um modelo que relaciona a velocidade ótima de desenrolamento com a tração do cabo, com base no conhecimento de alguns parâmetros, em especial os coeficientes de arrasto e sustentação aerodinâmica da asa.

Apesar de os resultados de simulação com ambas as estratégias terem se mostrado promissores, o controle de tração, bem como a operação completa do PK com geração elétrica, não pôde ser testado em campo pois a construção dos protótipos teve de ser interrompida devido à pandemia de Covid-19.

Medição de vento

Como já mencionado, a medição do vento é fundamental para uma operação eficaz e segura do aerogerador AWE – assim como o é para a tecnologia eólica convencional. Além disso, é necessária a realização de campanhas de medição de vento em altitude para se identificar áreas em que a tecnologia AWE seria economicamente viável, inclusive onde a tecnologia convencional não é. Alternativas atuais, como sensores LIDAR, SODAR e torres de medição anemométrica, apresentam fortes li-

mitações, seja pelo alto custo ou impossibilidade de medição em elevadas altitudes (200 metros ou mais). Nesse contexto, foi criada uma iniciativa spin-off no projeto UFSCkite para o desenvolvimento de um sistema de medição de vento inovador. Após avaliação das tecnologias disponíveis, optou-se pelo uso de tomografia acústica da atmosfera. O sistema de medição é composto essencialmente por um drone equipado com uma sirene, cujo som é captado por um conjunto de microfones dispostos no solo, conforme esquemático da Fig. 10. Dependendo da direção e velocidade do vento, as ondas sonoras emitidas pela sirene sofrem modificações no caminho até cada microfone, de tal forma que, por inversão de modelo, os parâmetros do meio de propagação, tais como densidade e temperatura do ar, e direção e velocidade do vento, podem ser determinados [7]. Um protótipo desse sistema de medição começou a ser montado e testes preliminares em laboratório foram bem sucedidos, mas o sistema não pôde ser concluído a tempo de serem realizados

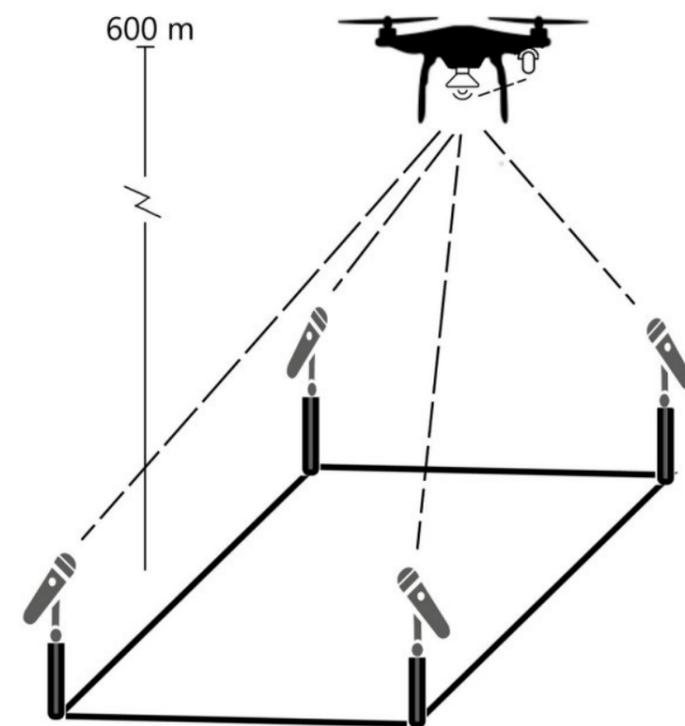


Fig. 10: Sistema de medição de vento por tomografia acústica da atmosfera. Fonte: arquivo UFSCkite.

testes de campo antes da pandemia de Covid-19, quando todos os trabalhos experimentais do UFSCkite tiveram que ser suspensos.

Considerações finais

A tecnologia de aerogeradores com asas cabeadas, mais conhecida pela sigla AWE, do inglês Airborne Wind Energy, começou a ser extensamente pesquisada a partir dos anos 2000, inicialmente em universidades da Europa e dos EUA. Com base nos resultados das pesquisas até aqui estima-se que os aerogeradores AWE consigam produzir energia elétrica a um custo inferior ao da tecnologia convencional, além de apresentarem outras vantagens. Em primeiro lugar, a substituição da torre por um ou mais cabos de comprimento variável permite à asa operar em altitudes maiores, onde o vento geralmente é mais forte e consistente, o que caracteriza um potencial energético maior. Isto, por sua vez, contribui para que localidades próximas aos grandes centros de consumo tornem-se viáveis para a energia eólica, reduzindo custos e perdas na transmissão de energia. Além disso, a tecnologia AWE acarreta uma redução substancial nos custos do aerogerador, especialmente em material, transporte e instalação, devido à ausência de uma torre que deva suportar os esforços mecânicos elevados decorrentes da operação da turbina. A fundação para o ponto de ancoragem da asa ao solo também se torna mais simples e barata. Finalmente, a tecnologia AWE é versátil, podendo ser utilizada na forma de pequenas unidades geradoras móveis (algumas dezenas de kW) para o atendimento de demandas pontuais, ou sendo incorporada em unidades fixas na ordem de alguns MW, tanto no solo quanto na água.

O projeto UFSCkite foi fundado no De-

partamento de Automação e Sistemas do Centro Tecnológico da UFSC em Florianópolis, em setembro de 2012, com o objetivo de desenvolver a tecnologia AWE, alinhado com as estratégias de desenvolvimento tecnológico nacional. Até o presente momento, o UFSCkite permanece como o único grupo de pesquisa dedicado à tecnologia AWE na América Latina. Nesses quase 10 anos de trajetória, o projeto, além do desenvolvimento da tecnologia AWE em si, fomentou a formação de recursos humanos de alta qualidade, aliando teoria à prática em um ambiente de inovação tecnológica. Ao total passaram pelo projeto cerca de 30 estudantes de graduação e pós-graduação, sendo completados 1 pós-doutorado, 3 doutorados, 7 mestrados, 10 iniciações científicas, 4 trabalhos de conclusão de graduação e 4 estágios de graduação. Além disso o projeto recebeu 3 alunos de intercâmbio (Holanda, França e EUA). Mais informações sobre o projeto, incluindo uma lista de publicações, estão disponíveis na página <https://ufsckite.ufsc.br/>.

Desde 2017 a ampliação do projeto UFSCkite em várias frentes de trabalho com nível crescente de complexidade resultou em uma certa estagnação no desenvolvimento dos protótipos. A razão para isso foi a alta rotatividade dos membros da equipe, principalmente causada pela falta de recursos financeiros para reter os engenheiros e pesquisadores formados frente às oportunidades no mercado de trabalho. Naquele momento, seguindo um fluxo natural que começa com a pesquisa de base, majoritariamente feita com recursos públicos, até a pesquisa avançada, tipicamente feita por empresas (ou em parceria com elas), iniciou-se uma busca por parceiros no setor empresarial que pudessem apoiar a continuidade do projeto rumo ao desenvolvimento de produtos que chegassem ao mercado de

geração de energia. É o estágio em que o projeto se encontra atualmente. A questão que se coloca atualmente é: em um horizonte de 5 a 10 anos, quando estima-se que a tecnologia AWE chegue ao mercado, o Brasil irá comprar ou vender a tecnologia? Se a intenção for vender, o momento para apoiar a continuidade do projeto UFSCkite é agora. E a boa notícia é que o PPGEAS/UFSC já formou especialistas na área e negociações para investimentos privados no projeto estão atualmente em curso.

Referências bibliográficas

- [1] M. De Lellis. Airborne Wind Energy with Tethered Wings: Modeling, Analysis and Control. PhD thesis (PPGEAS), Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, October 2016. URL <http://www.bu.ufsc.br/teses/PEAS0222-T.pdf>.
- [2] H. Araujo. Controle da Máquina Elétrica de um Aerogerador com Aerofólio Cabeado na Configuração Pumping-Kite. Dissertação de mestrado (PPGEAS), Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. 2017. URL <https://tede.ufsc.br/teses/PEAS0254-D.pdf>.
- [3] M. De Lellis, R. Saraiva, and A. Trofino. Turning angle control of power kites for wind energy. In Pro-

ceedings of the IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control, pages 3493–3498, Firenze, Italy, December 2013. IEEE. URL <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6760419>.

[4] R. Saraiva, M. De Lellis, and A. Trofino. Passive phase design of a pumping kite wind generator. In Proceedings of the 19th IFAC World Congress, volume 19-1, pages 6764–6769, Cape Town, South Africa, August 2014. IFAC. URL <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01338>.

[5] M. De Lellis, A. K. Mendonca, R. Saraiva, A. Trofino, and A. Lezana. Electric power generation in wind farms with pumping kites: An economical analysis. Renewable Energy, 86:163–172, February 2016. URL <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.002>.

[6] M. T. Schoenknecht. Controle de Tração em Aerogeradores com Asas Cabeadas. Dissertação de mestrado (PPGEAS), Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. 2021. URL <https://tede.ufsc.br/teses/PEAS0385-D.pdf>.

[7] F. H. Mantelli. Multirotor UAV as a Platform for Acoustic Tomography of the Atmosphere. Dissertação de mestrado (PPGEAS), Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. 2020.



Fig. 11: Equipe do projeto em exposição no Centro Tecnológico do campus Trindade da UFSC, em Florianópolis, março de 2019. Fonte: arquivo UFSCkite.

Defesas de Doutorado

Título	Discente	Orientador
Controle Supervisório de Sistemas de Manufatura sob Incertezas de Processamento e Restrições Temporais: Modelagem, Síntese e Implementação	Rodrigo Szpak	Max Hering de Queiroz
Distributed Optimal Control of DAE Systems: Modelling, Algorithms, and Applications	Marco Aurelio Schmitz de Aguiar	Eduardo Camponogara
Communication Interface Manager for Improving Performance of Heterogeneous UAV Networks	Laura Michaella Batista Ribeiro	Leandro Buss Becker
Abordagem para Evolução da Arquitetura de Sistemas Embarcados com Uso Intenso de Sensores e Atuadores	Diego Câmara Sales	Leandro Buss Becker
Contributions to Folding Mechatronics: a Scissor-Like Elements based Approach	Juan Gabriel Guerrero Grijalva	Edson Roberto de Pieri
Contribution to state estimation of semilinear parabolic distributed parameter systems with applications to transport reaction systems	Ivan Francisco Yupanqui Tello	Daniel Ferreira Coutinho
Contribuições para o Controle Preditivo Não Linear Prático com Modelos Identificados por Redes de Estado de Eco	Bernardo Barancelli Schwederksy	Rodolfo Cesar Costa Flesch

Defesas de Mestrado

Título	Discente	Orientador
Estudo sobre Modelagem e Controle com Restrições de Manipulador Móvel Não-Holonômico Planar	Luiz Armando Barbosa Hage	Edson Roberto de Pieri
HeMuRo: A Generic Framework for Heterogeneous Multi-Robot Systems	Afonso da Fonseca Braga	Edson Roberto de Pieri
Análise do Consumo de Combustível e da Capacidade Viária para a Condução Ecológica em Microsimulação de Tráfego	Luiz Felipe Curtarelli	Werner Kraus Junior
Multi-Robots Coordination System for Urban Search and Rescue Post-Disaster Assistance based on Supervisory Control Theory	Marcelo Elias Simon	Fabio Luis Baldissera
Programação Orientada a Agentes BDI em Sistemas Embarcados	Matuzalem Muller dos Santos	Jomi Fred Hubner
Desenvolvimento de um Protótipo para Medição de Capacitâncias aplicado a Tomografia Capacitiva Elétrica com Eletrodos Ativos	Guilherme Bueno Silveira	Daniel Juan Pagano
Desenvolvimento de Métodos Não Invasivos para Avaliação do Processo de Amaciamento de Compressores Herméticos Alternativos	Gabriel Thaler	Rodolfo Cesar Costa Flesch
Decentralized Synchronous Diagnosis with Coordination	Patricia Monica Campos Mayer Vicente	Felipe Gomes de Oliveira Cabral

Time

PPGEAS

O PPGEAS conta com um time de profissionais de excelência com conhecimento em inúmeras áreas que colaboram com um programa de referência internacional. Nesta edição, conheça os Professores **Marcelo Stemmer** e **Alexandre Trofino**.

Marcelo Ricardo Stemmer

Nasci em Porto Alegre, RS, em 3 de abril de 1960. Meu pai, Caspar Erich Stemmer, era Engenheiro Mecânico e, além de professor da URGs (hoje UFRGS), era um dos sócios fundadores de uma pequena empresa chamada PRODUTEC. Minha mãe, Helena Amélia Stemmer, era Engenheira Civil e trabalhava com cálculo estrutural, tendo participado de vários projetos em Porto Alegre, inclusive fazendo parte dos cálculos da ponte sobre o rio Guaíba.

Em 1964 meu pai foi convidado a ministrar aulas de Engenharia Mecânica na UFSC, em Florianópolis. Na época, a universidade era bastante nova (tinha sido criada em 1960 e o curso de Mecânica estava em implantação). Gostou tanto da ilha que não quis mais voltar. Pedi transferência e acabou se tornando professor da UFSC, tendo logo em seguida se tornado diretor da Escola de Engenharia

Industrial, que posteriormente passou a ser o atual Centro Tecnológico (CTC). Minha mãe, após ministrar aulas em uma escola, se tornou professora na Engenharia Civil da UFSC. Eu e meus dois irmãos viemos para Florianópolis em 1965. Meu irmão Gaspar é 5 anos mais velho e estudou física e matemática. A irmã Miriam é 3 anos mais nova e estudou biblioteconomia.

Fiz o antigo primário (nome dado na época aos 4 primeiros anos de escola) no Grupo Escolar Barreiros Filho, em Florianópolis. Depois consegui uma vaga no Colégio de Aplicação (CA) da UFSC por meio de um exame de admissão que existia na época. No CA fiz o antigo ginásio e parte do "Científico" (hoje seria um segundo grau com boa formação nas ciências básicas, visando preparar para um curso superior). Entre 1974 e 1976 moramos em Brasília, onde meu pai



Fig. 1: Formatura CTC em 1983 com colegas do CA.



Fig. 2: No WZL, Alemanha, 1987.

passou a exercer um cargo como coordenador do PREMESU (Programa de Expansão e Melhoria das Instalações de Ensino Superior). Lá estudei numa escola pública enorme, chamada CEMEB. Em 1976 voltamos para Florianópolis, pois meu pai havia sido nomeado Reitor da UFSC. Voltei a estudar no CA, onde completei o segundo grau em dezembro de 1977.

Em seguida prestei vestibular para Engenharia Elétrica na UFSC, onde ingressei em março de 1978. Na UFSC fiz diversas novas amizades, mas tive também alguns colegas que estiveram comigo já no Colégio de Aplicação. Dentre eles está o atual colega do DAS e PPGEAS, professor Eugenio de Bona Castellan Neto.

No período de faculdade me dediquei também um pouco aos esportes, em especial às artes marciais. Estimulado por um colega da Elétrica que era faixa preta, fiz caratê du-

rante quase 9 anos, até terminar o mestrado, e mais tarde tae-kwon-do por cerca de 7 anos.

Conclui o curso de Engenharia Elétrica no tempo regulamentar (5 anos) e, como tinha planos de seguir uma carreira acadêmica, ingressei logo em seguida no mestrado, ainda na UFSC. Entrei para o antigo LCMI (Laboratório de Controle e Microinformática) em março de 1983, onde fiz diversas disciplinas de controle, mas também algumas de Informática. Acabei me interessando pela área de informática e peguei um tema de mestrado envolvendo Sistemas de Tempo Real, sob a orientação do professor Jean-Marie Farines.

Terminei o mestrado em julho de 1985 e ingressei como pesquisador na fundação CERTI, trabalhando em alguns projetos com o saudoso (já falecido) professor Hermann Luecke, de nacionalidade alemã. A pesquisa envolvia ensaio de compressores.

Neste período me candidatei a uma bolsa de doutorado na Alemanha pelo DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst, ou Serviço Alemão de Intercambio Acadêmico). Consegui uma bolsa em 1986 para realizar o doutorado na Universidade Técnica do Reno-Westfália (RWTH-Aachen), onde meu pai tinha feito uma especialização na década de 1950. Fui para um instituto chamado WZL (WerkZeugmaschinenLabor, Laboratório de Máquinas-Ferramenta), pertencente à faculdade de Engenharia Mecânica da RWTH-Aachen, mas que atuava em várias áreas multidisciplinares de automação industrial. Na época, e ainda hoje, era um dos centros de pesquisa mais importantes da Alemanha em Engenharia.

Trabalhei lá com diversos assuntos pois, no sistema deles, o doutorando atua em diversos projetos até achar seu próprio tema. Isso resultou em uma formação bastante multidisciplinar que hoje seria considerada atípica (a formação hoje é muito mais voltada para uma super especialização em uma área com foco restrito). Participei durante quase um ano de um projeto envolvendo montagem com robótica, mas depois acabei me dedicando a uma pesquisa em Comunicação em Tem-



Fig. 3: Orientador, banca de doutorado e meu pai em 1991.

po Real e Controle via Rede, de onde efetivamente saiu a minha tese. Em paralelo, tive participação na época em um projeto envolvendo Redes Neurais Artificiais aplicadas a uma bancada de ensaio de motores elétricos. O tema me chamou muito a atenção e continuei trabalhando com Redes Neurais por muitos anos depois do doutorado, apesar de

não ter sido meu tema de tese. Participei também de alguns projetos com empresas, pois no WZL esse tipo de experiência era exigido (ainda é). Desenvolvi um software para a empresa Carl Zeiss, que me rendeu um convite para trabalhar lá. Confesso que a oferta foi tentadora, mas eu estava determinado a seguir na carreira acadêmica. A experiência na



Fig. 4: Recebendo o Doktor-Hut WZL em 1991



Fig. 5: França, 2004, Pos-doc.

Alemanha tinha sido muito boa, com muitos aprendizados, mas eu estava há 5 anos sem voltar ao Brasil e a saudade foi mais forte!

Assim, em 1991 defendi minha tese e voltei para Florianópolis. Como não havia nenhum concurso para professor quando cheguei, voltei a trabalhar na fundação CERTI por cerca de um ano. Em 1992 finalmente apareceu uma vaga para o LCMI/EEL, onde eu tinha feito o mestrado. Prestei concurso e ingressei como professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC em agosto de 1992.

Em 1990 tinha sido criado o curso de Engenharia de Controle e Automação, sob a liderança dos professores do LCMI, em particular os colegas Jean-Marie Farines (que tinha sido meu orientador de mestrado) e Augusto Bruciapaglia (que tinha sido meu professor em algumas disciplinas). Em 1997, participei de um grupo de professores que se propôs a

criar um novo departamento, o DAS (Departamento de Automação e Sistemas), que se tornou o principal responsável pelo novo curso.

Participei ativamente na implantação de diversas disciplinas do curso, incluindo Informática Industrial I, oferecida pela primeira vez em 1992/2, Informática Industrial II, oferecida pela primeira vez em 1993/1, e Sistemas Distribuídos e Redes de Computadores, oferecida pela primeira vez em 1993/2. Todas estas disciplinas hoje tem outros nomes em decorrência de algumas reformas curriculares, das quais inclusive participei bastante no papel de coordenador do curso, função que exerci duas vezes.



Fig. 6: Faixa vermelha Tae-Kwon-Do.



Fig. 7: Família.

No entanto, na pós-graduação continuamos vinculados ao PPGEEL ainda por alguns anos, até que foi criado o PPGEAS em 2007. Diversos dos meus primeiros orientandos de mestrado e doutorado foram ainda do PGEEL.

Seguindo de certa forma a multidisciplinaridade da minha própria formação, orientei trabalhos em diversos temas, envolvendo comunicação em tempo real, sistemas de controle via rede (networked control systems), redes industriais, redes neurais, lógica Fuzzy e outros. Acabei me interessado bastante por uma classe particular de problemas, chamada Reconhecimento de Padrões (pattern recognition), onde muitas das técnicas citadas tem papel importante. Foi através do Reconhecimento de Padrões que comecei a me interessar por Processamento de Imagens e Visão Computacional, área a que me dedico desde o ano 2000, aproximadamente. Dentre os temas em que atuei e orientei dissertações e teses, posso citar: reconhecimento de objetos

em imagens 2D e 3D, navegação de robôs móveis por imagens, vídeo vigilância inteligente, inspeção visual de placas de circuito impresso, inspeção visual de desgaste de ferramentas em máquinas operatrizes, biometria por análise de marcha, etc.

Em 1997 conheci a Márcia,, que na época era professora do CED/NDI e se tornou minha esposa em 1999. Márcia Tivemos dois filhos, a Glória e o Luís. A Glória hoje faz doutorado na Alemanha (na Humboldt Universitaet em Berlim) e o Luís estuda computação na UFSC.

Em 2004 fui com toda a família para uma nova estada no exterior. Minha esposa estava fazendo doutorado e queria fazer um estágio sanduíche na França. Ele tinha conseguido uma orientadora na prestigiosa Sorbonne. Me organizei para acompanhá-la e consegui uma bolsa de pos-doc da CAPES. Encontrei um laboratório chamado LIP6 (Laboratoire d'Informatique de Paris 6), vin-

culado a universidade de Paris VI (Piere et Marie Curie), que fazia pesquisa em informática, com um grupo forte em reconhecimento de padrões. Lá estudei diversos tópicos dentro desta temática, incluindo SVM (Support Vector Machines), HMM (Hidden Markov Models), DBN (Dynamic Bayesian Networks) e outros. Muitas das minhas orientações posteriores foram nesta linha, principalmente em aplicações com algum vínculo com Automação.

A experiência de viver em Paris foi muito interessante, pois a cidade, além de belíssima, tem uma oferta cultural imbatível. Aprender francês foi um desafio! Alemão tinha sido mais fácil, pois meus pais falavam o idioma, que eu escutava com frequência em casa. Retornamos ao Brasil em fevereiro de

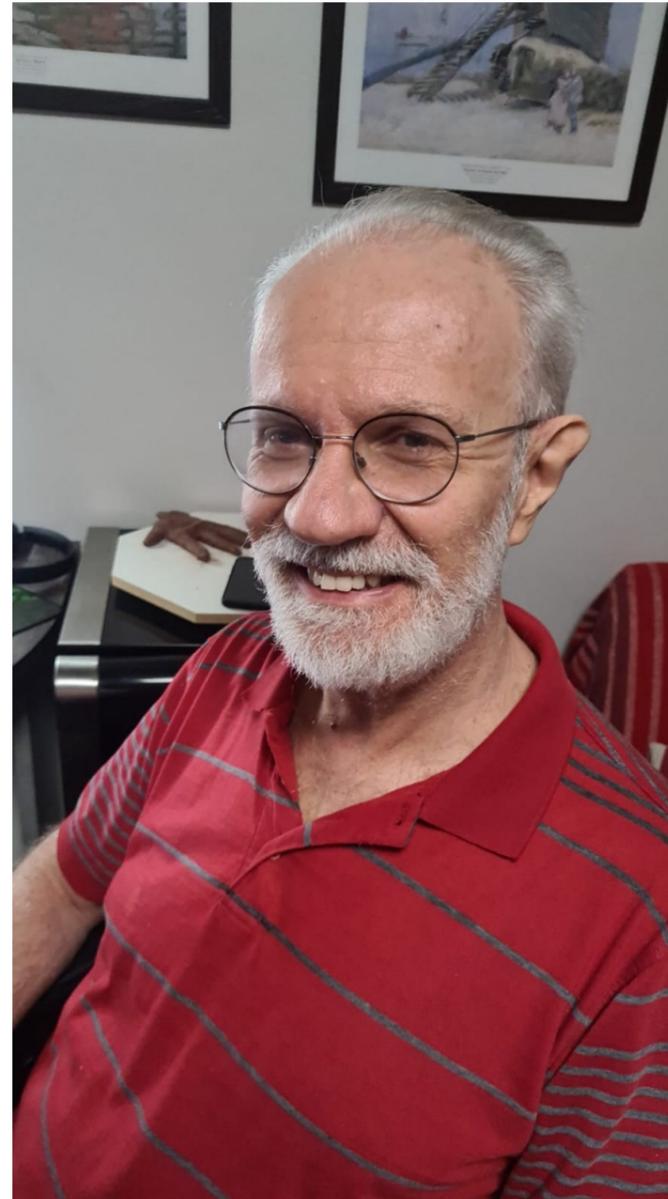


Fig. 8: Marcelo nos dias atuais.

2005, em tempo de iniciar as aulas em março daquele ano.

Ao longo de todos estes anos auxiliei na formação de um grande número de alunos. Ao longo de mais de 30 anos consegui vagas para estágio e PFC para pouco mais de 250 alunos da Automação em Aachen, onde fiz o doutorado. Alguns deles acabaram ficando na Alemanha em definitivo. Orientei 42 dissertações de mestrado e 11 teses de doutorado (com mais em andamento). Participei de diversos projetos de pesquisa, alguns dos quais em cooperação com a Alemanha. Atuei também em diversos projetos com empresas, possivelmente em decorrência da experiência na Alemanha, onde isso era estimulado.

Hoje sou muito grato pelo excelente ambiente de trabalho no DAS/UFSC e pelas valiosas oportunidades providas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (PGEAS). ■

Alexandre Trofino Neto

Nasci no século passado (kkk) em 4/12/1958 numa pequena cidade do interior do estado de São Paulo, chamada Ibatinga, conhecida pelos bordados. Desde pequeno, sempre tive uma queda pela engenharia e astronomia.

Aos 15 anos, saí do conforto da casa dos meus pais para estudar eletrotécnica numa escola técnica em São Carlos, à 100 km da minha cidade natal. Foram 3 anos de muitas mudanças, estudo e despertar para um mundo novo que se abria onde eu tinha que tomar decisões sem a ajuda dos meus pais.

Ao terminar o curso técnico, com 18 anos, eu já tinha o desejo de estudar no Rio de Janeiro, e com o apoio dos meus pais foi isso que eu fiz. Fui estudar Engenharia Elétrica na

Universidade Católica de Petrópolis, uma bela cidade nas montanhas, próxima à cidade do Rio de Janeiro.

Foram 5 anos de estudos, farra, muitas descobertas, inclusive me tornei naturalista com impacto na minha vida até hoje.

Ao terminar o curso em 1981, meu primo Nivaldo, professor da engenharia mecânica da Unicamp, me incentivou a continuar os estudos. Meu desejo era estudar o cérebro como um sistema de neurônios interconectados, mas não encontrei nada parecido na época. O mais próximo que eu encontrei foi estudar o efeito de estímulos elétricos em nervos de rã. Uma pena, pois descobri muitos anos mais tarde que o professor Nicoletis na USP já tra-



Fig. 1: Época do primário.



Fig. 2: University of Newcastle, Austrália. Foto na Blue Mountains.

balhava em neurociência nessa época. Acabei ingressando no mestrado no ano seguinte para estudar sistemas interconectados na engenharia elétrica. Não consegui fazer o link com sistemas neuronais, mas acabei descobrindo uma nova área que marcou meu futuro: a área de controle de sistemas.

Ao defender o mestrado eu resolvi experimentar a vida acadêmica antes de continuar num doutorado. Foi assim que um concurso me levou à Universidade Federal de Goiás onde trabalhei por poucos meses, tempo suficiente para perceber que vida acadêmica me interessava.

Foi nesse contexto que um outro concurso me trouxe até o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina em dezembro de 1985.

Em julho de 1988 eu me mudei para Grenoble, na França, onde fui fazer doutorado. Grenoble fica nos Alpes franceses e é uma cidade muito interessante, muito bem localizada e com ótima infraestrutura, tanto acadêmica quanto de lazer. Ali fiquei por quatro anos estudando alguns aspectos de controle robusto. Foi uma experiência fantástica sob todos os aspectos. Conhecer e participar de uma outra cultura tão rica, como a francesa, foi uma experiência extraordinária. Viajei por toda a Europa e vários outros países, alguns a trabalho, outros por lazer.

Uma das viagens mais marcantes da minha vida foi para o Egito, onde conheci as pirâmides, andei de cavalo no deserto, desci o Nilo até o Vale dos Reis. Num mergulho vi os peixes e corais do Mar Vermelho e vi os tons



Fig. 3: Viagem ao Egito.

pastéis no entardecer nas montanhas do Sinai. Ver a tumba de Tucancamon com todos aqueles hieroglifos nas paredes me remeteu ao tempo de escola onde eu estudava história do Egito antigo num livro com as ilustrações que naquele momento eu via pessoalmente. Foi uma sensação de realização pessoal tão grande que guardo até hoje na lembrança.

Mas as realizações não foram apenas do lado pessoal. Minha tese de doutorado recebeu um prêmio de melhor tese do ano na área de automação e controle do Institut National Polytechnique de Grenoble, uma prestigiada instituição francesa, e acabei sendo homenageado no jornal da cidade. Em 1993 eu voltei para Florianópolis realizado. Desde então me dediquei a estudar teoria de controle robusto e publiquei muitos artigos, alguns bastante citados. Orientei vários alunos de mestrado e doutorado, participei de vários projetos de pesquisa, alguns como coordenador, fui edi-

tor de revista internacional e ajudei a criar o DAS e o PPGEAS, onde trabalho desde a criação.

Em 2001 iniciei um ano sabático onde, nos primeiros seis meses, estudei sistemas de controle para despoluição num laboratório de biotecnologia em Narbone, na França, e nos seis meses seguintes, estudei técnicas de controle por chaveamento no Department of Electrical Engineering da University of Sidney na Austrália e na sequência um mês no Department of Electrical Engineering da City University of Hong Kong, em Hong Kong.

Em 2010 iniciei um outro ano sabático, dessa vez na University of California at San Diego, no Department of Mechanics and Aerospace para aprofundar os estudos em sistemas chaveados.

Em 2007 iniciei uma colaboração com o Laboratório POLO da Engenharia Mecânica



Fig. 4: Copa do mundo na época do doutorado.

da UFSC para desenvolver sistemas de controles para sistemas de refrigeração. Orientei alguns alunos de mestrado com temas envolvendo implementações práticas relacionadas a problemas reais da indústria de refrigeradores. Foi uma colaboração bastante frutífera que gerou emprego para os alunos envolvidos.

Em 2013 iniciei o projeto UFSCkite, com a proposta de desenvolver uma nova tecnologia de exploração da energia eólica, mais barata, com menor impacto ambiental e passível de ser utilizada num maior número de localidades, mesmo sem ventos expressivos em baixa altitude. Essa nova tecnologia substitui as torres e pás de um aerogerador convencional por um cabo e uma asa e com isso consegue explorar ventos em altitudes elevadas (600 m de altitude por exemplo) onde os ventos são

mais fortes, mais frequentes e laminares. O projeto começou com um mestrado acadêmico e logo a equipe cresceu e recebemos financiamento do CNPq para construção de protótipos que podem ser vistos no Laboratório UFSCkite do DAS/CTC/UFSC. Vídeos de ensaios e detalhes do projeto podem ser encontrados no site www.ufsckite.ufsc.br. No final de 2021 várias reportagens sobre o projeto deram bastante visibilidade a ele e alguns investidores se mostraram interessados em transformá-lo numa startup. As negociações estão hoje em curso. A reportagem do Jornal Nacional da Globo foi ao ar no dia 25/12/2021 e pode ser vista no link

<https://g1.globo.com/jornal-nacional/playlist/jornal-nacional-ultimos-videos.ghtml#video-10159452-id>

Em 2017 iniciei uma colaboração com o



Fig. 5: Eu, professor Oswaldo da USP, professor Pericles, da Universidade Federal de Campina Grande, professor Paulo da Unicamp e professor Cury do DAS na cidade de Oaxaca, México.

professor Roger Walz, um neurocirurgião do Hospital Universitário (HU) da UFSC, para estudar o cérebro e desenvolver marcadores (padrões biológicos) que pudessem ser utilizados no contexto de uma interface cérebro-computador, e finalmente pude realizar um sonho de quando eu iniciei o mestrado. Orientei alguns alunos de mestrado e um de doutorado em temas nessa área envolvendo o uso de reconhecimento de padrões no EEG (eletroencefalograma) para fins de controle de alguma máquina, por exemplo dirigir com o pensamento uma cadeira de rodas ou um veículo qualquer. A coleta do EEG era feita a partir de uma touca com eletrodos, como usualmente é feito o exame de EEG em hospitais. É possível também estimular o interior do cé-

rebro para, por exemplo, corrigir um ataque epiléptico ou combater formas graves de depressão. Mas para isso se faz necessário a inserção de eletrodos em regiões específicas do cérebro. Alguns experimentos nessa direção foram feitos sob coordenação do professor Roger no HU, inicialmente em ratos, primeiro passo para testes em seres humanos. Minha participação e dos meus alunos foram no estabelecimento de marcadores obtidos do EEG, algoritmos para reconhecimento de padrão e na parte de hardware para os estímulos elétricos no cérebro. Os eletrodos eram inseridos em regiões específicas do cérebro dos ratos pela equipe do professor Roger. Hoje a empresa americana Neuralink, criada em 2016 pelo bilionário Elon Musk, está a poucos pas-



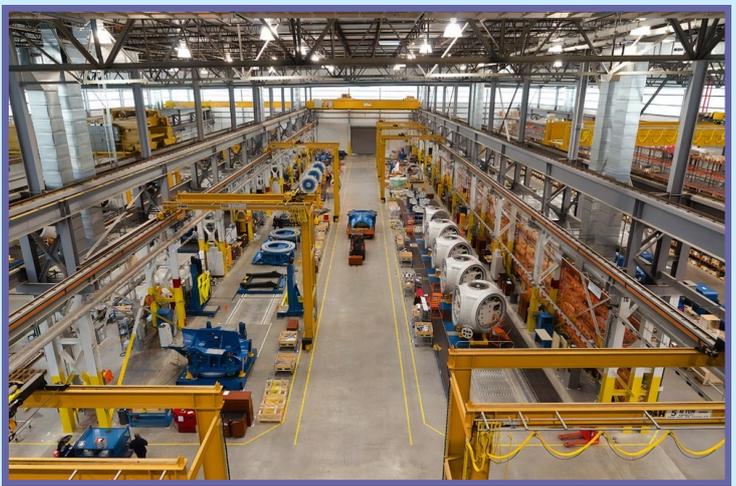
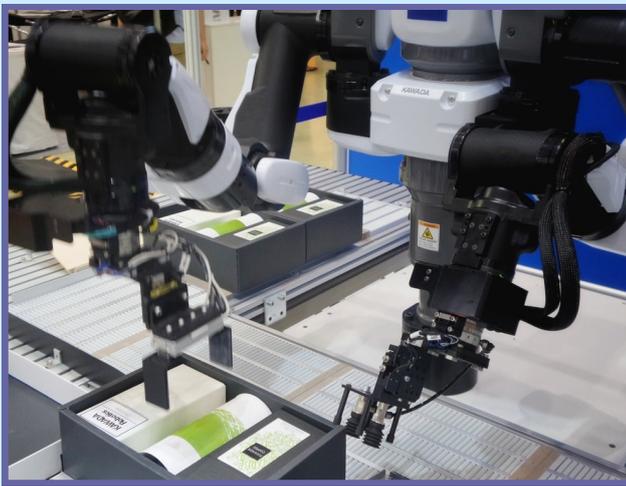
Fig. 6: Alexandre nos dias atuais.

sos de fazer implantes em seres humanos.

Em Março de 2019 eu completei tempo de aposentadoria e resolvi me aposentar para poder me dedicar com mais tempo a transformar o projeto UFSCkite numa startup e desde então estou como professor voluntário no DAS e no PPGEAS.

Nessa época foi publicada uma pesquisa da Stanford University sobre os 100 mil pesquisadores mais influentes do mundo. Veja o link da pesquisa para detalhes [Notícias da UFSC](#). Essa lista mencionava 600 brasileiros. Destes, 15 eram da UFSC e eu era um deles. Essa pesquisa foi refeita em 2021 e meu nome ainda estava na lista apesar de aposentado. Veja o [link](#). Foi um belo presente para minha aposentadoria.

Hoje me dedico essencialmente ao projeto UFSCkite, à música (toco piano e violão e componho), atividades físicas e à minha família.



Venha estudar **CONTROLE, AUTOMAÇÃO E SISTEMAS COMPUTACIONAIS** em um dos mais prestigiados programas de pós-graduação do Brasil! Nota 6 (de 7) na CAPES.

Cursos de mestrado e doutorado acadêmicos na melhor cidade do país:
Florianópolis!

Abertura de processos seletivos 2 vezes por ano.

<https://pgeas.ufsc.br/>

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS (PPGEAS) - UFSC

