



**HAL**  
open science

## Métricas QoE para Sintonia Automática de Controle Preditivo de Microrredes Renováveis

Gustavo Henrique Santos de Santana, Johannes Daniel Fischer, Marcelo Menezes Morato, Julio Elias Normey-Rico

► **To cite this version:**

Gustavo Henrique Santos de Santana, Johannes Daniel Fischer, Marcelo Menezes Morato, Julio Elias Normey-Rico. Métricas QoE para Sintonia Automática de Controle Preditivo de Microrredes Renováveis. Congresso Brasileiro de Automática 2024, Sociedade Brasileira de Automática; IFACx, Oct 2024, Rio de Janeiro, Brazil. hal-04650752

**HAL Id: hal-04650752**

**<https://hal.science/hal-04650752v1>**

Submitted on 17 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

# Métricas QoE para Sintonia Automática de Controle Preditivo de Microrredes Renováveis <sup>★</sup>

Gustavo H. Santos de Santana<sup>\*</sup> Johannes Daniel Fischer<sup>\*</sup>  
Marcelo M. Morato<sup>\*,\*\*</sup> Julio E. Normey-Rico<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Controle e Automação de Processos de Energia (INCT CAPE), Dept. de Automação e Sistemas (DAS), Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

<sup>\*\*</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP<sup>†</sup>, GIPSA-lab, 38000 Grenoble, France. <sup>†</sup>Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes. (marcelo.menezes@ufsc.com)

---

**Abstract:** In this paper, we propose a novel automatic tuning approach for MPC schemes acting as energy management systems for renewable microgrids. In particular, we assess how Quality of Experience (QoE) metrics can be used to adapt the predictive control law. The practical interest of the approach is that the local operator can adapt the microgrid coordination with respect to high-level goals, without any re-synthesis step of technical knowledge on MPC. We provide concrete simulation results from a *green H<sub>2</sub>* microgrid in order to show the advantages of the proposed technique in simplifying the MPC tuning by adapting the microgrid coordination according to local user specifications.

**Resumo:** Neste artigo, apresentamos uma nova estratégia de (re-)sintonia automática para controladores preditivos baseados em modelo (MPC) para a gestão de energia em microrredes renováveis. Especificamente, investigamos como métricas baseadas na experiência dos usuários finais das microrredes - as chamadas QoE (*Quality of Experience*) - podem ser incorporadas no processo de ajuste dos respectivos MPCs. Como principal contribuição, propomos novas métricas do tipo QoE e uma estratégia para reajuste da lei de controle preditivo com base nestes índices. O interesse prático é que o reajuste é feito com base em objetivos de alto-nível do operador local, sem novo projeto de MPC ou de conhecimento técnico no tema. Levando em conta um caso de estudo concreto de uma microrrede de Hidrogênio *verde*, através simulação numérica realística, demonstramos como a estratégia de re-sintonia oferece vantagens do ponto de vista do usuário, automaticamente adaptando o desempenho do controle às suas preferências.

*Keywords:* Model Predictive Control; Quality of Experience; Renewable Microgrids.

*Palavras-chaves:* Controle Preditivo baseado em Modelo; Qualidade da Experiência; Microrredes Renováveis.

---

## 1. CONTEXTO

Atualmente, em contraste às mudanças do regime climático do planeta e seus mais diversos efeitos antropogênicos catastróficos (Bologna and Aquino, 2020; Flores et al., 2024), há um crescente interesse prático e acadêmico em tecnologias e aplicações de engenharia ecologicamente coerentes, pautadas no desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, um dos aspectos fundamentais da chamada *Agenda para 2030* - e dos diferentes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - é a geração de energia de forma eficiente, limpa e democrática para as populações (Lup et al., 2023).

Microrredes - também chamadas de *redes inteligentes* - representam uma inovação paradigmática para esse contexto, visando facilitar a geração de energia renovável, de

forma distribuída e próxima ao usuário final. Na prática, microrredes são sistemas com geração e armazenamento local de energia, cujo objetivo é o cumprimento de demandas (energéticas, térmicas, etc). Na literatura recente, diversos estudos indicam como algoritmos de otimização e, em especial, estratégias de Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC, no caso: *Model Predictive Control*), representam abordagens ótimas para minimização do impacto ambiental associado aos processos de geração de energia (em microrredes), tal como para a melhora da eficiência global destes processos, c.f. (Vergara-Dietrich et al., 2019; Morato et al., 2021).

MPC é uma técnica teoricamente estabelecida, baseada na solução de um problema de otimização a cada amostra de tempo. Há, hoje, uma extensa literatura específica sobre MPC para uma ampla variedade de configurações e sistemas, como pode ser visto em (Morato et al., 2023). No caso de microrredes renováveis, MPCs são projetados para a gestão energética ótima, de um ponto de vista supervisor, tipicamente levando em conta modelos de

---

<sup>\*</sup> Agradecemos o financiamento da CAPES, do CNPq (304032/2019 - 0, 403949/2021 - 1, 406477/2022 - 1), e da *European Commission (Marie Skłodowska-Curie Action: REALOPT4CONTROL project)*.

conservação de massa e energia - do tipo *Energy Hubs* (Mohammadi et al., 2017). Bordons et al. (2020) discutem, em detalhes, o projeto destes controladores para diferentes tipos de microrredes renováveis.

Considerando a ampla validação de abordagens MPC para a gestão central de energia em microrredes, c.f. (Mantovani et al., 2014; Polimeni et al., 2021; Morato et al., 2022), nós propomos, neste breve artigo, uma abordagem para a (re-)sintonia automática de tais algoritmos, com base em métricas relacionadas à experiência dos usuário finais - as chamadas *Quality of Experience (QoE) metrics*. Tipicamente, e.g. (Zhou et al., 2012; Goudarzi et al., 2019; de Oliveira Luna et al., 2021), índices QoEs são usados para a qualificação e/ou quantificação *a posteriori*, quanto à operação de um dado sistema. Neste trabalho, como principal novidade teórica, formulamos QoEs como índices para a (re-)sintonia da lei de controle preditiva, sem que haja necessidade de uma nova etapa de projeto, a despeito de mudanças no cenário meteorológico.

A ideia central do artigo é representada na Fig. 1: dado uma microrrede renovável em operação, coordenada por um algoritmo MPC (nominal) previamente projetado, visamos re-sintonizá-lo de forma automática, com base em métricas QoE, levando em conta objetivos (de alto nível) do operador local da microrrede. O interesse prático do método de re-sintonia reside no fato de que ele permite a adaptação do algoritmo de controle avançado (MPC) sem requerer algum conhecimento prévio da técnica (ou etapa de projeto de engenharia), por parte dos operadores da microrrede. É de importância ressaltarmos que operadores locais tipicamente não projetam os sistemas de coordenação e distribuição de energia das microrredes, sendo estes instalados e projetados por terceiros. Assim, através do método de reajuste via QoEs permite uma adequação da operação da microrrede com relação à objetivos de alto-nível. Em particular, nossas principais contribuições são:

- (1) A proposta de QoEs para a operação de microrredes renováveis, levando em conta o desempenho face ao cumprimento de demandas, à sustentabilidade da operação e à gestão do armazenamento local (de energia);
- (2) Uma abordagem de re-sintonia de algoritmos MPC para gestão de energia em microrredes, com base na adaptação da função custo através do agendamento das ponderações no índices QoE;
- (3) Análise e debate da metodologia proposta através de simulações numéricas realísticas, considerando uma microrrede de hidrogênio *verde*.

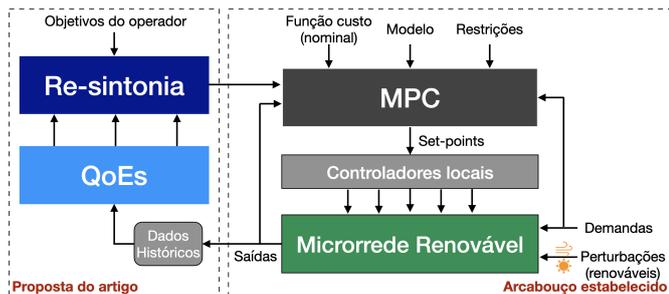


Figura 1. Representação esquemática da proposta.

**Organização.** Na Seção 2, resumimos o arcabouço teórico referente à operação ótima de microrredes renováveis usando MPC. As novas métricas QoE são apresentadas na Seção 3, ao passo que a abordagem de re-sintonia automática é apresentada na Seção 4. Resultados da aplicação da metodologia proposta são apresentados na Seção 5, incluindo um debate sobre vantagens e limitações. Considerações finais são apresentadas na Seção 6.

**Notação.** A matriz identidade de tamanho  $j$  é denotada por  $I_j$ , enquanto  $I_{j_i}$  denota a  $i$ -ésima linha de  $I_j$ . O complemento ortogonal de uma matriz  $A$  é dado por  $A^\perp$ . Para um sinal discreto no tempo  $v : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^{n_v}$ , denotamos por  $v(k) \in \mathbb{R}^{n_v}$  cada uma de suas entradas e por  $\{v(k)\}_{k=0}^{L-1}$  a sequência correspondente de  $L$  amostras, ou, simplesmente,  $v$ . Usamos  $\text{col}\{v\} := [v(0)^T, \dots, v(L-1)^T]^T$  para a vetorização da coluna  $v$  e  $\text{diag}\{v\}$  para a matriz diagonal em bloco formada por  $\text{col}\{v\}$ . O valor predito de uma determinada variável  $v(k)$  no instante de tempo  $k+i$ , calculado com base nas informações disponíveis no instante  $k$ , é denotado por  $v(k+i | k)$ . Em particular,  $v(k | k) = v(k)$ . A norma 2 ponderada é dada por  $\|x\|_Q := \sqrt{x^T Q x}$ .

## 2. MPC PARA MICRORREDES RENOVÁVEIS

Nesta Seção, resumimos as etapas fundamentais para a modelagem e o projeto de algoritmos tipo MPC para a gestão de energia em microrredes renováveis, considerando o arcabouço teórico elaborado em (Morato et al., 2021), c.f. extensões e adaptações em (Bordons et al., 2020).

### 2.1 Modelagem via Energy hubs

Especificamente, consideramos a abordagem de modelagem de microrredes renováveis com base nos chamados *energy hubs*, e.g. (Geidl et al., 2007). Em síntese, podemos descrever um *hub* como uma representação estática de conversor ou armazenador de energia, observado desde uma perspectiva terciária (supervisória), a passos de amostragem longos - tipicamente na escala de horas, de tal forma que os regimes transitórios possam ser desconsiderados.

No caso de sistemas de conversão entre diferentes formas de energias, um *hub* (do tipo conversor) é modelado diretamente por:  $y_j(k) = \sigma_j z_j(k)$ , sendo  $k$  o índice referente à amostra discreta de tempo e  $\sigma_j$  a eficiência energética deste sistema. A variável  $z_j(k)$ , no caso de um *hub* conversor **controlável** (*despachável*), é denotada  $u_j(k)$  e representa o *set-point* de operação do sistema. Já no caso de um *hub* conversor **não controlável**,  $z_j(k) = w_j(k)$  indica a perturbação de ativação do sistema. Tomemos dois exemplos:

- (1) Uma célula de combustível, que gera uma potência elétrica instantânea  $y_{\text{Célula}}(k)$  a qualquer momento de interesse, sendo acionada por um controle local cujo *set-point* é dado por  $u_{\text{Célula}}(k)$ , é modelada por  $y_{\text{Célula}}(k) = \sigma_{\text{Célula}} u_{\text{Célula}}(k)$ ;
- (2) Já um painel fotovoltaico, que gera uma potência elétrica instantânea  $y_{\text{FV}}(k)$  para a uma irradiação solar  $w_{\text{FV}}$  (perturbação, sinal não controlável), é modelado por  $y_{\text{FV}} = \sigma_{\text{FV}} w_{\text{FV}}(k)$ .

No caso de processos de armazenamento (de energia, massa, etc), um *hub* (do tipo armazenador) é modelado

segundo uma dinâmica discreta do tipo:  $x_j(k+1) = \delta_j x_j(k) + \epsilon_j (y_j^{\text{in}}(k) - y_j^{\text{out}}(k))$ , sendo  $\delta_j \in (0, 1]$  um escalar referente ao percentual de perda de energia armazenada entre duas amostras consecutivas (e.g.: a eficiência de armazenamento de uma bateria),  $\epsilon_j$  um fator de conversão (e.g., massa-energia, potência-energia, etc), e  $x_j(k)$  o nível de armazenamento instantâneo no dado *hub*, variável tipicamente dada no intervalo  $[0, 100]$  %. Ressaltamos que  $y_j^{\text{in}}(k)$  e  $y_j^{\text{out}}(k)$  representam, respectivamente os sinais que indicam as entradas e as saídas de massa/energia/etc no dado *hub*. Tomemos dois exemplos:

- (1) Uma bateria elétrica com perda de 1% de energia armazenada entre amostras, por exemplo, é um *hub* armazenador, cujo estado de carga instantâneo (e.g. *state of charge* (SOC)) é modelado por  $x_{\text{SOC}}(k+1) = 0.99x_{\text{SOC}}(k) + \epsilon_{\text{SOC}} (y_{\text{SOC}}^{\text{in}}(k) - y_{\text{SOC}}^{\text{out}}(k))$ , sendo  $y_{\text{SOC}}^{\text{in}}(k)$  e  $y_{\text{SOC}}^{\text{out}}(k)$  as potências elétricas de entrada e de saída da bateria, respectivamente.
- (2) Um tanque de hidrogênio verde, sem perdas entre amostras, por sua vez, também é um *hub* armazenador, cujo nível de hidrogênio (e.g. *level of hydrogen* (LOH)) é modelado por  $x_{\text{LOH}}(k+1) = x_{\text{LOH}}(k) + \epsilon_{\text{LOH}} (y_{\text{LOH}}^{\text{in}}(k) - y_{\text{LOH}}^{\text{out}}(k))$ , sendo  $y_{\text{LOH}}^{\text{in}}(k)$  e  $y_{\text{LOH}}^{\text{out}}(k)$  as vazões de entrada e de saída do tanque, respectivamente.

Ao considerarmos microrredes renováveis, sistemas com múltiplas perturbações de entrada (sinais renováveis não controláveis, tais como irradiação solar, velocidade do vento, etc), múltiplas operações de conversão entre tipos de energia, uma série de armazenadores e sistemas controláveis, obtemos uma representação global, ao compactarmos todas as equações obtidas seguindo a metodologia dos *energy hubs*. Esta representação é do tipo espaço de estados discreto, e tem a seguinte estrutura:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_w w(k), \quad (1)$$

sendo  $x \in \mathbb{R}^{n_x}$  os estados da microrrede (percentual ocupado (níveis) em cada subsistema de armazenamento),  $u \in \mathbb{R}^{n_u}$  os sinais de controle (*set-points* para os subsistemas de despacho energético controlável), e  $w \in \mathbb{R}^{n_w}$  as perturbações renováveis, não controláveis. Tipicamente, saídas energéticas de interesse - denotadas  $y \in \mathbb{R}^{n_y}$ , tais como a produção total da microrrede (para, e.g., cumprimento de uma demanda local), são diretamente dadas por:

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + D_w w(k). \quad (2)$$

Ressaltamos que o modelo apresentado nas Eqs. (1)-(2) leva em conta dinâmicas lentas, de nível terciário, com um comportamento temporal discreto na escala de horas. Por conseguinte, este modelo considera implicitamente que cada sinal de referência  $u$  é um *set-point* cujas estratégias de controle de baixo nível garantem o rastreamento - ou seja, assumimos que a regulação física, de corrente e tensão, tal como a regulação de potências, são funcionais e operantes, como mostra a Fig. 1. Assim, levemos em conta apenas a gestão de energia da microrrede, levando em conta critérios de desempenho relativos à operação ótima e ao planejamento econômico e de eficiência energética global do sistema. Desta construção, é imposto que cada sinal de controle (do ponto-de-vista terciário)  $u_j, \forall j \in \mathbb{N}_{[1, n_u]}$  deve

ser definido levando em conta as restrições operacionais relativas ao  $j$ -ésimo subsistema da microrrede.

Ademais - para condições nominais de operação, sem falhas e sem incertezas de modelagem - consideramos que os estados (níveis de armazenamento) também devem ser limitados à regiões admissíveis. Neste sentido, consideramos as seguintes restrições operacionais:  $x(k) \in \mathcal{X}$  e  $u(k) \in \mathcal{U}, \forall k \geq 0$ , com conjuntos definidos na Eq. (3).

$$\begin{aligned} \mathcal{X} &:= \{x \in \mathbb{R}^{n_x} : |x_j| \leq \bar{x}_j, \forall j \in \mathbb{N}_{[1, n_x]}\}, \\ \mathcal{U} &:= \{u \in \mathbb{R}^{n_u} : |u_j| \leq \bar{u}_j, \forall j \in \mathbb{N}_{[1, n_u]}\}. \end{aligned} \quad (3)$$

## 2.2 Gestão de energia via MPC

Levando em conta a modelagem de microrredes renováveis através do arcabouço dos *energy hubs*, consideramos, ao longo deste trabalho, o projeto de algoritmos de gestão (ótima) de energia usando o ferramental do controle preditivo. Especificamente, projetamos controladores MPC visando o cumprimento das demandas da microrrede, a admissibilidade da operação (i.e. satisfação de todas as restrições operacionais), e o rastreamento de sinais de referência pré-estabelecidos para os estados (i.e. *set-points* de níveis para os armazenadores) e para as variáveis manipuladas (i.e. *set-points* locais para os subsistemas controlados).

Nesse contexto, consideramos  $e_x(k+j|k) = x_r(k+j) - x(k+j|k)$  e  $e_u(k+j|k) = u_r(k+j) - u(k+j|k)$  como os sinais de erro de rastreamento dos estados e dos sinais de controle, respectivamente, sendo  $x_r$  e  $u_r$  sinais de referências conhecidos (especificados pelo operador local da microrrede) - para os estados e para as entradas, respectivamente. Ademais, consideramos a seguinte função de custo multi-objetivo:

$$J_k := \sum_{j=0}^{N_p-1} \ell(e_x(k+j|k), e_u(k+j|k)) + V(e_x(k+N_p|k)),$$

cujas parcelas  $\ell(e_x, e_u) := \|e_x\|_Q^2 + \|e_u\|_R^2$  representa um custo de etapa sintonizado por ponderações matriciais quadráticas  $Q$  e  $R$  - definidas pelo operador local para impor o *trade-off* desejado entre esforço de controle e regulação dos estados, e cujo termo  $V(e_x)$  representa um custo terminal quadrático, sendo  $N_p$  o *horizonte de predição* do algoritmo.

*Nota 1.* Ressaltamos que  $J_k$  é uma função-custo que deve ser sintonizada de tal forma com que o algoritmo de controle imponha o desempenho desejado à microrrede controlada. Por exemplo, em uma microrrede na qual se deseja garantir que os níveis de armazenamento das baterias (estados) fiquem o mais próximo possível de um *set-point*  $x_r$ , pondera-se  $Q$  com magnitude maior que  $R$  - levando em conta o dimensionamento e a normalização das variáveis envolvidas.

A estratégia MPC (nominal) considerada neste trabalho considera a função-custo  $J_k$ , predições do comportamento futuro da microrrede levando em conta o modelo *energy-hubs* nas Eqs. (1)-(2), as restrições operacionais dispostas na Eq. (3), tal como um sinal  $d(k)$  de **demandas** energéticas locais, que devem ser cumpridas<sup>1</sup>. Ademais, consideramos

<sup>1</sup> Pressupomos que o sinal de demanda é conhecido a cada amostra  $k$ . Estratégias antecipativas podem ser incluídas nos algoritmos de

que possuímos *estimativas*<sup>2</sup> (meteorológicas) para as perturbações renováveis que afetam microrrede - e.g. sinal de irradiação, sinal de velocidade do vento, etc - representadas por  $w(k+j|k)$ ,  $\forall j \in \mathbb{N}_{[1, N_p-1]}$ , a cada amostra discreta  $k$ . Assim, a lei de controle preditiva para o problema em questão é obtida, a cada amostra discreta de tempo, dado um estado inicial medido  $x(k)$ , através da resolução do seguinte problema de otimização quadrático:

$$\begin{aligned} \min_{U_k} \quad & J_k + \|\xi\|_{Q_\xi}^2, \quad (4) \\ \text{s.t. :} \quad & \begin{cases} x(k+j+1|k) = Ax(k+j|k) + Bu(k+j|k) \\ \quad + B_w w(k+j|k), \forall j \in \mathbb{N}_{[0, N_p-1]}, \\ y(k+j|k) = Cx(k+j|k) + Du(k+j|k) \\ \quad + D_w w(k+j|k), \forall j \in \mathbb{N}_{[0, N_p-1]}, \\ y(k+j|k) = d(k) + \xi, \\ u(k+j|k) \in \mathcal{U}, \forall j \in \mathbb{N}_{[0, N_p-1]}, \\ x(k+j+1|k) \in \mathcal{X}, \forall j \in \mathbb{N}_{[0, N_p-1]}, \\ e_x(k+N_p|k) \in \mathbf{X}_f. \end{cases} \end{aligned}$$

Considerando que  $J_k^*$  é a solução ótima (mínimo global) do problema na amostra  $k$ , obtemos o sinal de controle a ser aplicado na microrrede  $u^*(k|k)$  como a primeira entrada do minimizador  $U_k^*$ .

Na Eq. (4), incluímos uma restrição suave fazendo com que as saídas da microrrede (energia gerada) seja igual a demanda somada a uma variável de folga  $\xi$ , que também é minimizada (em módulo). Ressaltamos que o ajuste da ponderação positiva  $Q_\xi$  é discutido extensivamente em, e.g., (Morato et al., 2021; Bordons et al., 2020). Ademais, para fins de certificados de estabilidade e factibilidade recursiva, consideramos  $\mathbf{X}_f$  como um conjunto terminal invariante<sup>3</sup> para o modelo da Eq. (1).

### 3. MÉTRICAS DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA

Nesta seção, introduzimos a primeira contribuição escolástica deste artigo: a formulação das métricas de Qualidade de Experiência (QoEs) para a posterior re-sintonia da estratégia de controle preditivo (nominal) descrita na Eq. (4). Para tal, consideramos um conjunto de  $N_o$  amostras<sup>4</sup> observadas da operação de uma microrrede renovável controlada pelo algoritmo MPC nominal.

Levando em conta a disponibilidade de tal conjunto de dados de operação nominal (de uma dada microrrede), propomos três métricas QoE específicas:

- (1) Uma métrica QoE que leva em conta o desempenho face ao rastreo dos sinais de referência dos estados - usada para quantificar a eficácia da estratégia de controle face ao problema do rastreo - representada por  $\text{QoE}_{\text{Armazenamento}}$ :

controle ao levarmos em conta, por exemplo, o comportamento futuro da demanda ao longo do horizonte, i.e.  $d(k+j)$ ,  $\forall j \in \mathbb{N}_{[1, N_p-1]}$ , caso este esteja disponível ou possa ser estimado.

<sup>2</sup> Na literatura específica, podem ser consultadas diversas estratégias para o projeto de estimadores meteorológicos usando séries temporais e aprendizado por reforço, e.g. (Natarajan and Karatampati, 2019) - tópico este fora do escopo do presente trabalho.

<sup>3</sup> Na literatura específica, apresentamos uma série de abordagens numéricas para o cômputo dos ingredientes (terminais) estabilizantes  $V(\cdot)$  e  $\mathbf{X}_f$ , e.g. (Morato et al., 2020, 2024) - fora do presente escopo.

<sup>4</sup> Tipicamente, estas  $N_o$  amostras representam um dia/mês/ano de operação contínuo do algoritmo MPC.

- (2) Outro índice QoE relacionado ao desempenho quanto ao cumprimento de demandas da microrrede - usada para quantificar a eficácia da estratégia de controle face a este objetivo - representada por  $\text{QoE}_{\text{Demandas}}$ ;
- (3) Uma última métrica QoE que diz respeito à eficiência energética sustentável da microrrede - usada para quantificar a de energia totalmente limpa (ecológica) coordenada através estratégia de controle - representada por  $\text{QoE}_{\text{Eco}}$ .

*Nota 2.* Ressaltamos que, no presente estudo, consideraremos (c.f. Seção 5) uma microrrede renovável com armazenamento e geração de hidrogênio verde. Para fins de ilustração do interesse de métricas QoE, indicamos que, no sistema considerado, buscamos empregar os indicadores de desempenho QoE relacionados ao rastreo dos *set-points* para os níveis de hidrogênio e de energia nas bateria (e.g.  $\text{QoE}_{\text{Armazenamento}}$ ), tal como buscamos quantificar a sustentabilidade da operação da microrrede (e.g.  $\text{QoE}_{\text{Eco}}$ ). Na prática, as métricas propostas aqui são usadas para a atualização *automática* dos parâmetros de sintonia do algoritmo MPC apresentado na Eq. (4) - conforme objetivos de alto-nível do operador local da microrrede (Seção 4), sem necessidade de um novo projeto MPC ou conhecimento técnico no tema por parte do operador.

O interesse prático da re-sintonia da estratégia de controle, com base em métricas QoE (relacionados a dados históricos de operação da microrrede, c.f. Fig. 1), se dá pelo fato de não requerer, do operador local, qualquer conhecimento técnico para o projeto da camada MPC. Assim, com base em objetivos de alto-nível do operador, possibilita-se, por exemplo, um melhor desempenho quanto ao seguimento das referências dos estados da microrrede, tal como uma operação com menos uso dos subsistemas controlados (logo, mais sustentável).

#### 3.1 Métrica $\text{QoE}_{\text{Armazenamento}}$

A primeira métrica proposta tem como objetivo quantificar o desempenho do sistema de controle de uma microrrede face ao rastreo dos sinais de referência dos estados. Para tal propósito, levamos em conta o uso do indicador estatístico *Root Mean Square* (RMS) - calculado a partir da raiz quadrada da média dos quadrados do desvio entre o sinal observado e sua referência. Assim, considerando um dicionário de dados observados de  $N_o$  amostras anteriores à amostra atual ( $k$ ), calculamos a métrica  $\text{QoE}_{\text{Armazenamento},j}$ , para cada subsistema (i.e.  $j \in \mathbb{N}_{[1, n_x]}$ ) como:

$$1 - \sqrt{\frac{1}{N_o} \sum_{i=k-N_o-1}^{k-1} \left( \frac{x_j(i) - x_{r,j}(i)}{\bar{x}_j} \right)^2}, \quad (5)$$

sendo  $\bar{x}_j$  o percentual de armazenamento máximo do  $j$ -ésimo estado armazenador (tipicamente 100%).

O índice RMS possibilita uma avaliação geral da precisão de rastreo. Conforme o erro de rastreo torna-se mais significativo, ele resulta em um maior impacto da medida  $\text{QoE}_{\text{Armazenamento}}$ , que decai. Ressaltamos que a métrica  $\text{QoE}_{\text{Armazenamento}}$  é dada entro do intervalo  $(0, 1]$ , sendo 1 o índice relativo a um desempenho perfeito de rastreo (sem erro). Ademais, importa pontuar que o índice

proposto é baseado no cálculo do desvio quadrático dos sinais de rastreo, sendo, portanto, mais sensível a grandes variações.

### 3.2 Métrica $\text{QoE}_{\text{Demanda}}$

A segunda métrica proposta leva em conta o desempenho face ao cumprimento da demanda da microrrede. Nesse sentido, adotamos um índice simplificado, que fornece uma avaliação mais direta e intuitiva face a este desempenho. Especificamente, para tal, calculamos o índice  $\text{QoE}_{\text{Demanda}}$  como a soma acumulada dos erros absolutos entre os  $n_y$  sinais de saída da microrrede ( $y_j$ ) e cada demanda associada ( $d_j$ ), considerando, novamente, o dicionário de dados de  $N_o$  amostras:

$$\text{QoE}_{\text{Demanda},j} = 1 - \frac{\sum_{i=k-N_o-1}^{k-1} |y_j(i) - d_j(i)|}{\sum_{i=k-N_o-1}^{k-1} d_j(i)}. \quad (6)$$

A proporção entre os valores absolutos dos erros com a demanda acumulada apresenta uma abordagem menos sensível a *outliers* do que o índice anterior, calculado via RMS. Ao utilizarmos um acúmulo linear, a métrica  $\text{QoE}_{\text{Demanda}}$  torna-se especialmente útil quando a robustez do sistema a *outliers* é importante, ou quando a magnitude média dos erros é mais crítica do que a variação. Ressaltamos que o objetivo de controle de cumprimento de demandas locais é, tipicamente, um imperativo técnico, sendo imposto que o índice  $\text{QoE}_{\text{Demanda}}$  seja, sempre, o mais próximo possível do valor unitário. Em operações típicas de microrredes ligadas ao distribuidor elétrico, pode haver uma multa tarifária associado à falta de garantia de demandas locais.

### 3.3 Métrica $\text{QoE}_{\text{Eco}}$

A terceira métrica proposta visa quantificar *quão renovável/sustentável* é, de fato, a microrrede da microrrede com a coordenação usando MPC. Para tal, calculamos uma simples proporção entre a s potência renovável utilizada sobre a potências total utilizada na microrrede em um dado período de tempo. Assim, considerando novamente o dicionário de dados de  $N_o$  amostras anteriores à amostra atual  $k$ , usamos:

$$\text{QoE}_{\text{Eco}} = \frac{\sum_{i=k-N_o-1}^{k-1} P_{\text{renovável}}(i)}{\sum_{i=k-N_o-1}^{k-1} P_{\text{total}}(i)} \quad (7)$$

na qual  $P_{\text{renovável}}(i)$  e  $P_{\text{total}}(i)$  representam, respectivamente, os sinais discretos referentes à potência renovável e à potência total utilizada na microrrede.

## 4. (RE-)SINTONIA AUTOMÁTICA DO MPC

Nesta Seção, apresentamos uma abordagem para a re-sintonia automática do algoritmo MPC apresentado na Eq. (4). Especificamente, utilizamos as métricas de Qualidade de Experiência (QoE) descritas na Sec. 3 - relacionadas ao armazenamentos, ao cumprimento das demandas e à produção de energia renovável - e propomos ajustes nas ponderações matriciais quadráticas  $Q$ ,  $R$  e  $Q_\xi$  da função custo do MPC.

Antes de formalmente apresentarmos as leis de re-sintonia, enfatizamos que as matrizes  $Q$  e  $R$  são ponderações definidas-positivas, selecionadas, na etapa inicial de projeto, para impor o balanço (*trade-off*) entre o objetivo de seguimento de referências (dos estados) e o esforço de controle, ao passo que a matriz de ponderação definida-positiva  $Q_\xi$  pondera a minimização da variável de folga  $\xi$ , definida como a diferença entre as saídas da microrrede e suas respectivas demandas. Para realizar a re-sintonia automática dessas matrizes ponderações, com base nas métricas QoE, propomos três ajustes distintos.

*Nota 3.* Os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$ , empregados nas formulações descritas a seguir, são definidos de acordo com as características específicas da microrrede e dos conjuntos de admissibilidade  $\mathcal{X}$  e  $\mathcal{U}$ .

Inicialmente, consideramos o reajuste automático da matriz de ponderação  $Q := \text{diag}\{Q_1, \dots, Q_{n_x}\}$  termo-a-termo, visando um melhor desempenho quanto ao seguimento de referência para os subsistemas de armazenamento (estados da microrrede). Em particular, usamos:

$$Q_j := Q_{j,0} a^{b(1-\text{QoE}_{\text{Armazenamento},j})}, \quad (8)$$

sendo  $Q_{j,0}$  a ponderação nominal referente ao  $j$ -ésimo estado. Quando a métrica  $\text{QoE}_{\text{Armazenamento},j}$  indica um desempenho desfavorável (ou seja, sendo ela mais próxima de zero), a ponderação de cada elemento  $Q_j$  da matriz diagonal  $Q$  é aumentada (em relação ao valor nominal  $Q_{j,0}$ ). Logo, o algoritmo MPC terá como função custo um termo de magnitude maior (de mais importância) quanto ao seguimento das referências de níveis de armazenamento pelos respectivos estados. Em seguida, empregamos a métrica  $\text{QoE}_{\text{Demanda}}$  para fins do ajuste termo-a-termo da matriz ponderação  $Q_\xi := \text{diag}\{Q_{\xi_1}, \dots, Q_{\xi_{n_y}}\}$ , visando aumentar o esforço de minimização (por parte do MPC) da “folga” entre cada demanda e a cada saída da microrrede. Esse ajuste é expresso por:

$$Q_{\xi_j} := Q_{\xi_j,0} e^{f(1-\text{QoE}_{\text{Demanda},j})}. \quad (9)$$

Na Eq. (9),  $Q_{\xi_j}$  representa a ponderação (atualizada) que influencia a otimização da variável de folga entre cada saída e sua demanda, ao passo produção de energia e a demanda, ao passo que  $Q_{\xi_j,0}$  denota a sintonia original para essa matriz. Caso observemos uma baixa satisfação no atendimento de demandas (ou seja, métrica  $\text{QoE}_{\text{Demanda}}$  próxima de zero), a ponderação  $Q_\xi$  aumentará, o que possibilita um melhor cumprimento da demanda ao ponderar mais a minimização da “folga” entre cada demanda e saída da microrrede. Por fim, empregamos a métrica  $\text{QoE}_{\text{Eco}}$  para ajustar da ponderação  $R$ , visando uma operação mais sustentável:

$$R := R_0 c^{d(1-\text{QoE}_{\text{Eco}})}. \quad (10)$$

Por meio do reajuste proposto na Eq. (10), o algoritmo de controle agirá visando reduzir o uso de fontes não renováveis de energia durante a operação da microrrede, contribuindo, portanto, com a melhoria da métrica  $\text{QoE}_{\text{Eco}}$ . Outrossim, é importante ressaltar que uma alta pontuação na métrica pode resultar em uma diminuição na capacidade de atendimento da demanda e no seguimento das referências de armazenamento, uma vez que o controle

estará priorizando o uso das fontes de energia renovável (objetivos tipicamente conflitantes).

No Algoritmo 1, sintetizamos a abordagem proposta neste artigo. Ressaltamos que a etapa de re-sintonia é automática no sentido de que ela não requer, do operador local da microrrede, uma etapa de projeto de um novo MPC, mas tão somente o uso da lei de reajuste adequada aos seus objetivos de alto-nível: Eq. (8) para melhor rastreamento das referências dos estados, Eq. (9) para melhor cumprimento das demais locais, e Eq. (10) para uma operação mais sustentável. A cada momento que o operador desejar adaptar o desempenho da microrrede, o Algoritmo 1 deve ser executado novamente.

---

*Algoritmo 1.* (Re-sintonia automática do MPC).

- (1) Inicializar o algoritmo MPC com valores preliminares considerados adequados, i.e. função custo  $J_j$  ponderada por  $Q = Q_0$ ,  $R = R_0$  e  $Q_\xi = Q_{\xi_0}$ .
  - (2) Aplicar o algoritmo MPC nominal à microrrede e coletar os dados históricos da operação ( $N_o$  amostras);
  - (3) Coletar o dicionário de dados referente às saídas da microrrede, i.e.  $\text{col}\{y_j(k - N_o - 1), \dots, y_j(k - 1)\}$ ,  $\forall j \in \mathbb{N}_{[1, n_y]}$ , e aos estados, i.e.  $\text{col}\{x_i(k - N_o - 1), \dots, x_i(k - 1)\}$ ,  $\forall i \in \mathbb{N}_{[1, n_x]}$ .
  - (4) Calcular métricas de QoE, com base nos dados coletados, usando as Eqs. (5)-(7).
  - (5) Levando em conta o objetivo de desempenho desejado, atualizar os pesos da função de custo do MPC com base nas métricas calculadas, segundo as Eqs. (8)-(10), conforme objetivo prático de interesse (de alto nível, do operador local).
- 

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta Seção, apresentamos resultados numéricos referentes à implementação da proposta de re-sintonia automática (Algoritmo 1). Especificamente, consideramos uma estratégia MPC para a coordenação de uma microrrede com armazenamento de hidrogênio *verde* - A microrrede Hylab, da Universidade de Sevilla <sup>5</sup>, aqui emulada usando um simulador numérico fidedigno implementado em Matlab <sup>6</sup>.

A microrrede em questão, ilustrada na Fig. 2, compreende os seguintes componentes: um banco de baterias de chumbo-ácido, um banco de baterias de Lítio ionizado (que, para fins de simplificação, não consideramos), conversores CC-CC, um painel fotovoltaico, um eletrolisador, uma célula de combustível e um tanque de hidreto metálico (armazenamento de  $H_2$ ).

<sup>5</sup> Detalhes específicos, parâmetros e especificações técnicas da Hylab estão disponíveis em (Valverde et al., 2013).

<sup>6</sup> As simulações apresentadas a seguir foram obtidas em um PC Intel i5 com 64 GB de RAM.

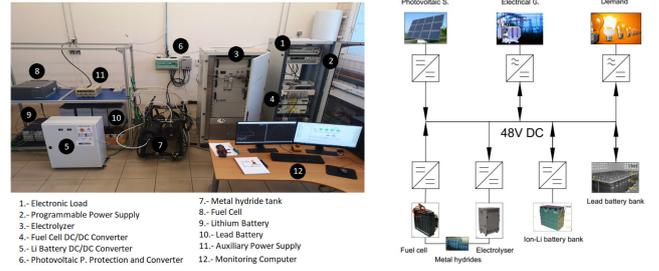


Figura 2. Configuração da microrrede Hylab.

O modelo matemático que governa a dinâmica da microrrede é representado pela Eq. (1), no qual o vetor de estado  $x \in \mathbb{R}^2$  corresponde ao estado de carga nas baterias (percentual de energia) e ao nível de hidreto nos tanques. As entradas de controle  $u \in \mathbb{R}^3$  são a potência do eletrolisador (que impacta na potência da célula de combustível), a potência da bateria, e a potência total gasta pela rede externa. Além disso, o sistema produz energia fotovoltaica dado a a irradiância solar sobre os painéis (perturbação  $\omega$ ).

Para as simulações que apresentamos na sequência, recolhemos os dados de demanda e de irradiação solar da microrrede ao longo de  $N_o = 24$  horas. Para os estados  $x$  da microrrede (referentes aos níveis de energia no banco de baterias e de hidrogênio no tanque), considerados, respectivamente, níveis de referência de 40% e 50% (objetivo prático). Ressaltamos que as restrições dos estados estão relacionadas ao nível de armazenamento de cada subsistema, ou seja,  $x_j \in [0, 100] \%$ ,  $\forall j \in \mathbb{N}_{[1, n_x]}$ .

A seguir, avaliamos a eficácia da implementação das métricas de re-sintonia das ponderações do MPC para dois cenários meteorológicos opostos: um dia ensolarado e, outro, parcialmente nublado. Para ambos os cenários, usamos as seguinte ponderações nominais:  $Q_0 = \text{diag}\{10^{-6}, 10^{-5}\}$ ,  $R_0 = \text{diag}\{5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-4}\}$  e  $Q_{\xi_0} = 4$ .

### 5.1 Re-sintonia com foco em QoE<sub>Armazenamento</sub>

Visando elucidar como nossa proposta de re-sintonia automática altera o MPC conforme o usuário local deseja priorizar o seguimento de referência dos estados do sistema, consideramos, primeiramente, um cenário ensolarado, descrito pelo gráfico apresentado na Fig. 3, com dados das primeiras 24 horas de operação da microrrede sob coordenação do MPC (nominal). Na Fig. <sup>7</sup> 3, podemos

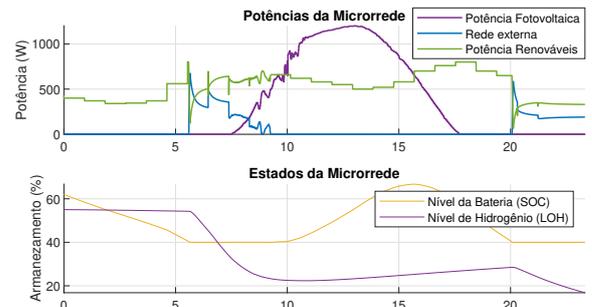


Figura 3. Microrrede Hylab: Cenário inicial ensolarado.

observar que, para atender à demanda energética local, o controlador MPC tolera que nível de hidrogênio fique (significativamente) abaixo da referência estabelecida, de 50% do tanque. Desta forma, para este primeiro cenário (de operação nominal), calculamos as métricas QoE propostas na Seção 4. Em particular, obtemos um QoE resultante referentes às baterias de 87.01% - indicando um desempenho razoavelmente bom -, ao passo que calculamos QoE resultante referentes ao tanque de hidrogênio de 78.60%. Além disso, o a métrica sustentável da operação for calculada como  $QoE_{Eco} = 88.24\%$ .

A partir dessas métricas QoE, aplicamos <sup>8</sup> a implementação da re-sintonia do MPC com base nas métricas referente aos subsistemas armazenadores, tal como descrito na Eq. 8, utilizando os coeficientes  $a = b = 10$ . Os resultados dessa implementação são ilustrados nos gráficos <sup>9</sup> apresentados na Fig. 4. Na Fig. 4, em relação ao cenário nominal,

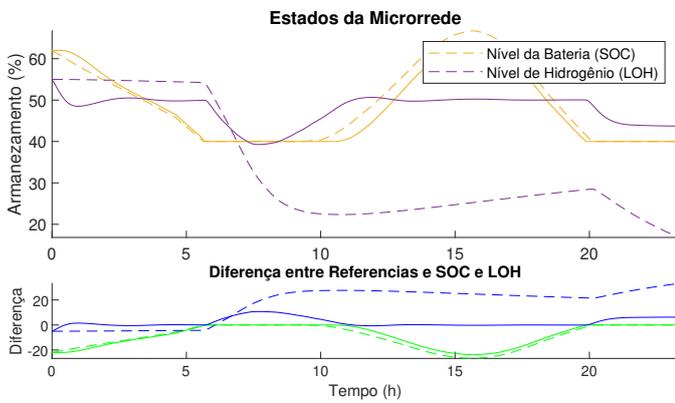


Figura 4. Microrrede Hylab: Re-sintonia do MPC com base no  $QoE_{Armazenamento}$ .

observamos uma melhoria no seguimento das referências tanto para as baterias, com um leve aumento da respectiva métrica QoE para 88.04%, quanto para os tanques de hidrogênio, com um aumento acentuado do respectivo QoE para 95.89%. Devido à priorização do seguimento das referências de armazenamento, houve um aumento no uso da rede externa para atender à demanda, resultando, por consequência construtiva, em uma redução na métrica  $QoE_{Eco}$  para 70.42%.

Enfatizamos, todavia, que tal imposição de menor sustentabilidade é um resultado de uma lei de re-sintonia que prioriza o seguimento de referências de armazenamento. Tal priorização é critério do operador local do sistema, que definirá qual reajuste deve ser operacionalizado.

<sup>7</sup> Observamos a potência fotovoltaica gerada pela irradiação solar (perturbação), a potência usada da rede externa (variável manipulada), tal como a potência renovável proveniente da célula de combustível com base em hidrogênio verde (variável manipulada). Também podemos observar a trajetória dos estados da microrrede (armazenamento de energia na bateria e de hidreto metálico no tanque).

<sup>8</sup> Em todos os gráficos apresentados na sequência, as linhas pontilhadas denotam a curva correspondente sem a integração das métricas QoE, para fins de comparação.

<sup>9</sup> Gráfico superior: trajetória dos estados da microrrede antes e depois da re-sintonia do MPC. Gráfico inferior: diferença entre as trajetórias antes e depois da re-sintonia (azul para LOH e verde para SOC).

## 5.2 Re-sintonia com foco em $QoE_{Eco}$

Visando ilustrar outro objetivo prático de um operador local, apresentamos, agora, a re-sintonia relacionada à sustentabilidade da operação.

Para implementação das ponderações com o objetivo de melhorar a proporção de energia renovável e reduzir o uso da rede externa, consideramos um cenário nominal nublado, novamente composto por um intervalo de tempo de 24 horas. Considerando este cenário nublado, calculamos, com base nos dados de operação do MPC nominal, o índice proposto  $QoE_{Eco}$  como 76.02%. Na sequência, re-sintonizamos automaticamente o MPC através da Eq. 10. Após a aplicação da atualização das ponderações com base no  $QoE_{Eco}$ , utilizando  $c = d = 3$ , obtemos o desempenho apresentado <sup>10</sup> na Fig. 5. Em comparação ao cenário nominal, o MPC re-sintonizado garante uma operação da microrrede mais sustentável: a diferença entre a demanda e a produção de energia através de fontes renováveis (do painel fotovoltaico) diminui consideravelmente, o que resulta, portanto, em um novo índice dado por  $QoE_{Eco} = 94.10\%$ .

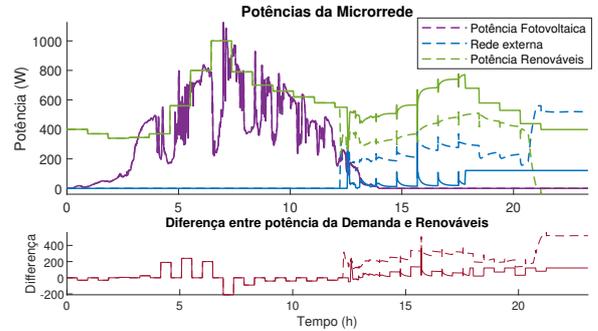


Figura 5. Microrrede Hylab: Resultados da implementação da  $QoE_{Eco}$ .

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, propusemos métricas numéricas para a avaliação do desempenho de microrredes renováveis. Tais métricas visam mensurar a *qualidade da experiência* (QoE) dos usuários-fim da microrrede - seja a distribuidora de energia ou consumidores locais. Consideramos, para tanto, a modelagem de microrredes renováveis usando o ferramental dos *Energy Hubs*, tal como a administração de energia, armazenamento e demandas (do ponto de vista terciário) operacionalizada por um algoritmo MPC. Os índices QoE propostos permitem avaliar a experiência da microrrede, dado um conjunto de dados, quanto ao rastreamento de referências para os estados do sistema (subsistemas de armazenamento de energia e massa), quanto ao cumprimento de demandas locais, e quanto à eficiência energética *limpa* (sustentável) do sistema. Ademais, levando em conta essas métricas, formulamos uma estratégia de re-sintonia automática do algoritmo MPC, visando melhorias no desempenho. A grande vantagem da estratégia de re-sintonia é que, através dela, o operador local da microrrede pode adequar o desempenho do sistema a objetivos de alto nível, sem que seja necessário um novo projeto de

<sup>10</sup> Curvas análogas às apresentadas na Fig. 3.

um MPC ou conhecimento técnico sobre tal. Através de um exemplo de simulação (realístico) de uma microrrede com armazenamento de hidrogênio verde, demonstramos a eficácia da estratégia proposta.

## REFERÊNCIAS

- Bologna, M. and Aquino, G. (2020). Deforestation and world population sustainability: a quantitative analysis. *Scientific reports*, 10(1), 7631.
- Bordons, C., Garcia-Torres, F., and Ridao, M.A. (2020). *Model predictive control of microgrids*, volume 358. Springer.
- de Oliveira Luna, J.D.F., dos Reis, G.N.G., da Costa Mendes, P.R., and Normey-Rico, J.E. (2021). Characterizing quality of experience for demand management in south brazil. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130, 106709.
- Flores, B.M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R.A., Levis, C., Lapola, D.M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., et al. (2024). Critical transitions in the amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555–564.
- Geidl, M., Koeppl, G., Favre-Perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G., and Fröhlich, K. (2007). The Energy hub: a powerful concept for future energy systems. In *Third annual Carnegie mellon conference on the electricity industry*, volume 13, 14.
- Goudarzi, P., Ghassemi, A., Mirsarraf, M.R., and Buyya, R. (2019). Joint energy-QoE efficient content delivery networks using real-time energy management. *IEEE Systems Journal*, 14(1), 927–938.
- Lup, A.N.K., Soni, V., Keenan, B., Son, J., Taghartapeh, M.R., Morato, M.M., Poya, Y., and Montañés, R.M. (2023). Sustainable energy technologies for the Global South: challenges and solutions toward achieving SDG 7. *Environmental Science: Advances*, 2(4), 570–585.
- Mantovani, G., Costanzo, G.T., Marinelli, M., and Ferrarini, L. (2014). Experimental validation of energy resources integration in microgrids via distributed predictive control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(4), 1018–1025.
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-Ivatloo, B., and Yousefi, H. (2017). Energy hub: From a model to a concept—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1512–1527.
- Morato, M.M., Cunha, V.M., Santos, T.L.M., Normey-Rico, J.E., and Sename, O. (2024). A robust nonlinear tracking MPC using qLPV embedding and zonotopic uncertainty propagation. *Journal of the Franklin Institute*, 106713.
- Morato, M.M., Holicki, T., and Scherer, C. (2023). Stabilizing model predictive control synthesis using integral quadratic constraints and full-block multipliers.
- Morato, M.M., Mendes, P.R.C., Normey-Rico, J.E., and Bordons, C. (2020). LPV-MPC fault-tolerant energy management strategy for renewable microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, 105644.
- Morato, M.M., Vergara-Dietrich, J., Esparcia Jr, E.A., Ocon, J.D., and Normey-Rico, J.E. (2021). Assessing demand compliance and reliability in the philippine off-grid islands with model predictive control microgrid coordination. *Renewable Energy*, 179, 1271–1290.
- Morato, M.M., Marquez, J.J., Zafra-Cabeza, A., Bordons, C., and Normey-Rico, J.E. (2022). Fault-tolerant energy management in renewable microgrids using LPV MPC. *IFAC-PapersOnLine*, 55(35), 1–6.
- Natarajan, V.A. and Karatampati, P. (2019). Survey on renewable energy forecasting using different techniques. In *2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control*, 349–354. IEEE.
- Polimeni, S., Meraldi, L., Moretti, L., Leva, S., and Manzolini, G. (2021). Development and experimental validation of hierarchical energy management system based on stochastic model predictive control for off-grid microgrids. *Advances in Applied Energy*, 2, 100028.
- Valverde, L., Rosa, F., and Bordons, C. (2013). Design, planning and management of a hydrogen-based microgrid. *IEEE transactions on industrial informatics*, 9(3), 1398–1404.
- Vergara-Dietrich, J.D., Morato, M.M., Mendes, P.R., Cani, A.A., Normey-Rico, J.E., and Bordons, C. (2019). Advanced chance-constrained predictive control for the efficient energy management of renewable power systems. *Journal of Process Control*, 74, 120–132.
- Zhou, L., Rodrigues, J.J.P.C., and Oliveira, L.M. (2012). QoE-driven power scheduling in smart grid: architecture, strategy, and methodology. *IEEE Communications Magazine*, 50(5), 136–141.