

Análise da Influência da Latência na Estabilidade do Controle Centralizado de uma Microrrede de Energia Elétrica

Lucas S. Chaves*, Adriano J. Masi*, Wanderson F. de Souza*, Thiago de Oliveira**, Braz de Jesus Cardoso Filho***, Danilo I. Brandao***

*Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
(e-mail: lucaoprof@ufmg.br, amasi@ufmg.br, wanderson.souza@ifmg.edu.br)

**Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Departamento de Engenharia Eletrônica
(e-mail: troliveira@cpdee.ufmg.br)

***Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Departamento de Engenharia Elétrica
(e-mail: cardosob@cpdee.ufmg.br, dibrandao@ufmg.br)

Abstract: This paper analyzes the impact of the communication system latency on the stability of a centralized microgrid. For comparison purposes, wireless communication technologies LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), Zigbee and LTE (Long Term Evolution) have been analyzed. The microgrid considered herein is a low-voltage microgrid composed of photovoltaic generation systems and energy storage systems (i.e., DER – Distributed Energy Resources) and dispersed loads. The microgrid control is centralized to steer power through the microgrid point of common coupling, named power-based control (PBC). The results have showed that the latency of the communication system and the step processing of the central controller significantly interfere with the positions of the poles within the unit circle of the Z-plane, which may interfere with the stability of the operation of the centralized microgrid.

Resumo: Esse artigo analisa os impactos da latência do sistema de comunicação na operação estável de uma microrrede centralizada de energia elétrica. Para fins de comparação, tecnologias de comunicação sem fio como LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), Zigbee e LTE (*Long Term Evolution*) foram analisadas. A microrrede considerada no estudo é uma microrrede de baixa tensão composta por sistemas de geração fotovoltaicos e sistemas armazenadores de energia (i.e., DER – *Distributed Energy Resources*) e cargas dispersas na rede. O controle da microrrede considerado é centralizado e realiza o despacho de potência no ponto de conexão da microrrede, também conhecido como controle baseado em potência, do inglês *power-based control*. Os resultados mostraram que a latência do sistema de comunicação e o intervalo de processamento do controlador central da microrrede interferem significativamente nas posições dos polos dentro do círculo unitário do plano Z, podendo interferir na estabilidade da operação da microrrede centralizada.

Keywords: microgrid; power-based control; distributed generation; communication; latency and stability.

Palavras-chaves: microrrede; controle baseado em potência; geração distribuída; comunicação, latência e estabilidade.

LISTA DE SÍMBOLOS

P_{Gmj}^{min}	disponibilidade de potência ativa mínima do j -ésimo DER conectado na fase m	Q_{Gmt}^*	referência de potência reativa total a ser injetada pelo conjunto de DERs na fase m
P_{Gmj}^{max}	disponibilidade de potência ativa máxima do j -ésimo DER conectado na fase m	α_{Pm}	coeficiente para o cálculo da potência ativa a ser injetada pelos DERs na fase m
Q_{Gmj}^{max}	disponibilidade de potência reativa máxima do j -ésimo DER conectado na fase m	α_{Qm}	coeficiente para o cálculo da potência reativa a ser injetada pelos DERs na fase m
P_{Gmj}	potência ativa injetada pelo j -ésimo DER na fase m	P_{Gmj}^*	referência de potência ativa a ser injetada pelo j -ésimo DER na fase m
Q_{Gmj}	potência reativa injetada pelo j -ésimo DER na fase m	Q_{Gmj}^*	referência de potência reativa a ser injetada pelo j -ésimo DER na fase m
P_{gridm}	potência ativa medida na fase m da rede no PAC	T_{PCC}	intervalo de processamento do CC
Q_{gridm}	potência reativa medida na fase m da rede no PAC	$T_{PCC,min}$	mínimo intervalo de processamento do CC
P_{PACm}^*	referência de potência ativa a ser injetada pela rede elétrica na fase m no PAC	ω_c	frequência de corte do controlador local do DER
Q_{PACm}^*	referência de potência reativa a ser injetada pela rede elétrica na fase m no PAC	L_{CC}	latência de comunicação do CC para o DER
P_{Gmt}^*	referência de potência ativa total a ser injetada pelo conjunto de DERs na fase m	L_{CDER}	latência de comunicação do DER para o CC
		L_{PDER}	latência de processamento do DER
		L_{Com}	latência de comunicação
		P_{Lmt}	potência ativa total consumida na fase m da MR
		P_{Gmt}	potência ativa total injetada pelos DERs na fase m

P'_{Gmt}	informação de P_{Gmt} recebida pelo CC com atraso
α'_{Pm}	informação de α_{Pm} recebida pelo DER com atraso
A_x	função discreta que representa o atraso $L_{CC} + L_{PDER}$
H_{ω_c}	função discreta do filtro do controlador local
A_{CDER}	função discreta que representa o atraso L_{CDER}
MSE	resultado do cálculo do erro quadrático médio
X_i	i -ésima amostra do sinal X
Y_i	i -ésima amostra do sinal Y

1. INTRODUÇÃO

A alta penetração das GDs (geração distribuída) e dos veículos elétricos nos sistemas de distribuição de energia elétrica, sem nenhuma forma de controle, causam impactos negativos na qualidade de energia, confiabilidade e segurança do sistema de distribuição (Naruto, 2017). Como principais impactos negativos, destacam-se sobretensão, desvio de frequência, desequilíbrio de tensão e a mudança das potências de curto-circuito (Naruto, 2017), (Barradas, 2018). Esses fatores limitam a capacidade de hospedagem (*hosting capacity*) dos sistemas de geração pela rede elétrica. Existem diferentes propostas para diminuir os impactos das GDs e aumentar a *hosting capacity*. Entre as diferentes estratégias de controle existentes, há aquelas que utilizam o conceito de Microrredes (MR) de energia elétrica. De Melo Leite (2016) propõe uma estratégia otimizada de regulação de tensão em redes de distribuição com GD fotovoltaica, em que as informações entre os inversores são transmitidas por um sistema de comunicação. Já Caldognetto, *et al.* (2015), apresenta um controle centralizado baseado em comunicação do tipo mestre/escravos que permite regular precisamente o fluxo de potência no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre a MR e a rede elétrica principal, de acordo com a demanda das cargas e a disponibilidade de energia dos recursos energéticos. Uma MR despachável é um conjunto de cargas, microgeradores e armazenadores de energia, chamados de recursos distribuídos, do inglês *Distributed Energy Resources* (DERs), capaz de operar tanto isolada quanto conectada à rede elétrica principal, em que sua principal característica é a de operar como uma unidade única, do ponto de vista da rede a montante.

Há diferentes tipos de controles que podem ser empregados em uma MR. Quanto a dinâmica da resposta e a dependência do *link* de comunicação, os controles podem ser primários, secundários e terciários. Estratégias de controle primário como as regulações de tensão, corrente e potências e detecção de ilhamento, devem possuir respostas rápidas e não dependem de um *link* de comunicação (Da costa, 2017). Estratégias de controle secundário, como o controle do fluxo de potência no PAC da MR (Caldognetto, 2015) podem ter respostas mais lentas, da ordem de centenas de milissegundos, e normalmente fazem uso do *link* de comunicação. Por fim, estratégias de controle terciário como o despacho da geração com base em critérios econômicos (Jamborsalamati *et al.*, 2018) são as mais lentas, da ordem de dezenas de minutos.

Quanto à topologia de comunicação empregada, o controle pode ser classificado como descentralizado, centralizado ou distribuído (Dos Santos Alonso, *et al.* 2019). O controle descentralizado proporciona a coordenação de múltiplos DERs sem a necessidade de um *link* de comunicação entre os controladores locais, comumente baseada em controle por

droop. É a estratégia mais confiável contudo, mais propícia à instabilidade. Já no controle centralizado, a comunicação é necessária para permitir que os controladores locais enviem informações para um Controlador Central (CC) com objetivo de receberem de volta referências de ajustes de suas operações. A comunicação é de baixa largura de banda e pode ser do tipo ponto-a-ponto (P2P) ou ponto-multiponto (PMP). No P2P, as interações entre o CC (servidor) e os DERs (clientes) são pontuais. Já no PMP, as referências de ajustes de operação são enviadas de uma só vez (*broadcast*) a todos os DERs por um único *link* de comunicação, diminuindo a latência da comunicação. Pela necessidade de comunicação com o CC, a estratégia de controle centralizada possui menor confiabilidade do que a descentralizada, porém possui maior estabilidade na operação. Por fim, existem os métodos de controle distribuídos, como o controle baseado em consenso, em que a comunicação ocorre entre os DERs vizinhos através de *links* de dados como P2P, PMP ou pessoa-a-pessoa. A diferença entre P2P e pessoa-a-pessoa é que na comunicação pessoa-a-pessoa não há a necessidade de um servidor central para a transmissão dos dados entre os agentes, permitindo que cada unidade da comunicação opere tanto como cliente quanto como servidor, diferente do que ocorre na P2P. Nessa estratégia a não operação de um agente do sistema de comunicação não inviabiliza a operação da MR.

Apesar da importância da comunicação para o controle da MR, há ainda pouca investigação na literatura sobre os impactos e as limitações impostas pela infraestrutura de comunicação para a operação estável de uma MR com controle centralizado. Sendo assim, o objetivo desse artigo é analisar a influência da latência do sistema de comunicação na operação estável de uma MR com controle centralizado operando conectada à rede.

Para organizar o trabalho, a Seção 2 apresenta características do sistema de comunicação que interferem na operação das MRs e algumas tecnologias de comunicação (TCs) sem fio. A Seção 3 apresenta a MR e a estratégia de controle centralizado utilizada. Na Seção 4 são propostos modelos simplificados contínuo e discreto do sistema de controle centralizado e coordenado para a análise da estabilidade da operação da MR. Na Seção 5 são apresentados os resultados das simulações e discussões, em que diferentes combinações de latências de comunicação e intervalos de processamento são estabelecidas para a análise da estabilidade. Por fim, as conclusões são apresentadas.

2. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

A escolha da infraestrutura de comunicação a ser utilizada em uma MR depende de limitações impostas por sua operação, relacionadas por exemplo à taxa de comunicação, à latência, ao alcance, à segurança e à perda de pacotes. Na sequência são apresentadas as principais características do sistema de comunicação que impactam na operação de uma MR e algumas TCs sem fio disponíveis no mercado possíveis de serem utilizadas nas MRs.

2.1 Considerações sobre o Sistema de Comunicação

As características dos sistemas de comunicação como, taxa de dados, perda de pacotes, topologia, latência, alcance, qualidade de serviço, segurança e disponibilidade (De Melo

Leite, 2016) são fundamentais para o controle das operações das MRs de energia elétrica. O atraso é uma das principais limitações associadas às aplicações do setor elétrico. As causas do atraso no sistema de comunicação incluem: processamento, congestionamento nos *links* de comunicação, atrasos de propagação, presença de obstáculos, ruídos, interferências, ataques cibernéticos e indisponibilidade da rede. Em Kang *et al.* (2017), são apresentadas algumas funções dos controladores que podem melhorar a robustez em relação a comunicação como *buffer* e estimadores nos controladores.

O padrão IEEE 1547 – 2018 trata de atualizações relevantes relacionadas aos requisitos para o desempenho, operação, teste, considerações de segurança e manutenção da interconexão e interoperabilidade entre o sistema de energia elétrica e os DERs. As recomendações de interconexão e interoperabilidade entre o sistema de energia e os DERs dão suporte a serviços baseados em comunicação, que possibilitam uma regulação de energia nas MRs, aumentando a capacidade de hospedagem do sistema (Dos Santos Alonso, *et al.* 2019).

2.2 Tecnologias de Comunicação sem Fio nas Microrredes

Em Saleh *et al.* (2019), os autores tratam dos impactos das limitações de diferentes TCs na operação de MRs de energia elétrica. No trabalho, os autores apresentam uma arquitetura de comunicação para redes inteligentes de energia elétrica divididas em três camadas: *Home Area Network* (HAN), *Field Area Network* (FAN) e *Wide Area Network* (WAN). Os requisitos das redes de comunicação utilizados dentro das MRs são em geral: latências permitidas, coberturas e taxas de dados. Esses requisitos dependem do nível de controle hierárquico. Para a camada HAN por exemplo, que trata de aplicações dentro das MRs com baixas taxas de comunicação (centenas de kbps) e curto alcance (centenas de metros), os autores sugerem a utilização da tecnologia ZigBee ou LTE. A Tabela 1 (Saleh *et al.*, 2019) apresenta as latências máximas das TCs sem fio indicadas para MRs.

Optou-se por incluir também nesse trabalho a análise da tecnologia LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) devido a sua vasta utilização em aplicações de Internet das Coisas (Adelantado, *et al.* 2017). Essa é uma tecnologia de comunicação sem fio com topologia estrela-estrela, de baixo consumo de potência, com baixas taxas de comunicação (22 b/s a 50 kb/s) e com alcance de 2 a 5 km para áreas urbanas, podendo atingir até 15 km em áreas suburbanas. A latência da comunicação LoRa depende da banda, taxa de codificação, modulação SF (*spreading factor*) utilizada e tamanho dos pacotes da comunicação. A Fig. 1 mostra como a latência (*Time on Air*) da comunicação LoRa varia com o tipo de modulação SF e com o tamanho da carga útil da camada MAC (*medium access control*) para uma taxa de codificação de 4/5 e uma largura de banda de 125 kHz. Note na Fig. 1 que, quanto maior o fator de modulação (de SF = 7 a SF = 12), maior será a latência de comunicação para a transmissão da mesma quantidade de Bytes. Contudo a escolha de um maior SF implica em maior alcance na comunicação.

Tabela 1. Latências máximas (Saleh *et al.*, 2019)

Zigbee	LTE	HSPA	LoRaWAN
140 ms	40 ms	26 ms	2,2 s

3. MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA

Entre as diferentes variações possíveis em uma MR estão o número de nós ativos (DERs), o número de cargas, o tipo de operação (conectada ou ilhada) e a estratégia de controle utilizada na operação (centralizada, distribuída ou descentralizada). Na sequência, são apresentadas a MR e a estratégia de controle utilizadas no estudo proposto.

3.1 Características da Microrrede de Energia Elétrica

A Fig. 2 apresenta a MR a ser utilizada no estudo proposto, a qual é baseada em (Brandao, 2015). A estrutura da MR refere-se à uma rede elétrica de baixa tensão com treze nós, sendo seis nós ativos, compostos por sistemas de geração fotovoltaicos monofásicos com armazenadores de energia, constituindo os DERs na rede. Todos os DERs possuem rádios, e podem se comunicar remotamente com o CC. O CC por sua vez está localizado no ponto de acesso comum ou PAC.

A interação entre o CC e os DERs é realizada pela estratégia de controle centralizado baseado em potência *Power-Based Control* (PBC) proposta em (Brandao, 2015). Para as simulações e estudos do impacto da latência na estabilidade da MR, considerou-se a MR operando conectada à rede elétrica.

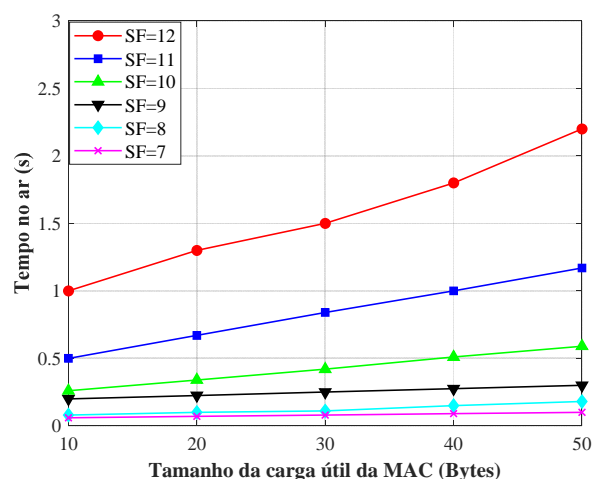


Fig. 1. LoRa: Latência x carga x SF (Adelantado, *et al.* 2017).

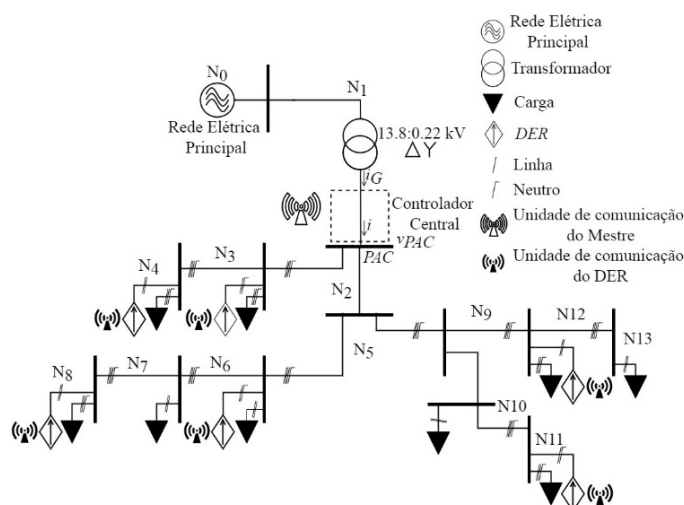


Fig. 2. MR com controle centralizado (Brandao, 2015).

3.2 Controle Centralizado Baseado em Potência

O controle baseado em potência PBC (Brandao, 2015) é uma estratégia de controle centralizada para MRs despacháveis em potência que regula precisamente o fluxo de potência através do PAC, de forma que cada DER contribua com uma parcela de potência proporcional à sua disponibilidade de energia. Esse objetivo é alcançado através da interação entre CC e os DERs. O PBC se estrutura em uma sequência de eventos para cada ciclo de controle. Inicialmente, o CC solicita a cada DER informações acerca das quantidades de potência ativa, reativa e disponibilidade atuais. Com isso ele computa coeficientes escalares que são posteriormente repassados aos DER, indicando-os qual o percentual da sua capacidade de potência ativa e reativa que deve ser injetada, para atender a um *setpoint* de despacho no PAC. No CC estão presentes os controles secundário e terciário da MR. Já nos DERs está presente o nível de controle primário, em que ocorrem as injeções de potência ativa e reativa na MR. O passo a passo da interação entre o CC e os DERs promovida pelo controle PBC e o significado de todas as informações e variáveis envolvidas nessa interação estão apresentados no Apêndice A.

A Fig. 3 apresenta as informações trocadas entre o CC (nível terciário) e o Operador do Sistema de Distribuição (OSD) ou Operador das Microrredes (OMR) e entre o CC (nível secundário) e os DERs (níveis primários). Por último, a atuação física dos DERs de injetar potência ativa, P_{Gmj} , e reativa, Q_{Gmj} , na rede elétrica da MR.

4. ANÁLISE DA ESTABILIDADE

Para avaliar a influência da latência na estabilidade do controle centralizado, foram propostos no artigo os sistemas simplificados da Fig. 4 e Fig. 5, baseados nos modelos do controle coordenado de potência ativa apresentados em (Brandao *et al.* 2019). A Fig. 4 mostra o modelo contínuo do controle centralizado secundário de potência ativa de uma MR. Para fins de simplificação, considerou-se apenas um DER no modelo. Nele estão destacados os modelos da dinâmica do controlador central (CC) em A, dos atrasos de comunicação em B e em E, da malha de potência do controlador local do DER em C e do sistema de potência da MR em D. Um modelo similar pode ser obtido para o controle de potência reativa. Ressalta-se que, para a obtenção dos modelos de atraso em B e em E, baseou-se na aproximação de primeira ordem de Padé da função contínua ideal do atraso τ , dada por $e^{-\tau s}$.

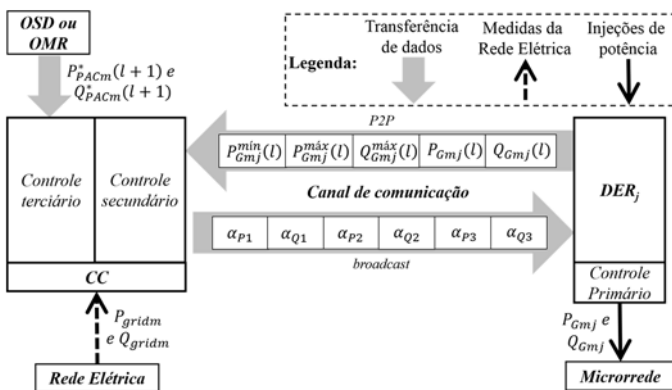


Fig. 3 Informações trocadas no controle PBC.

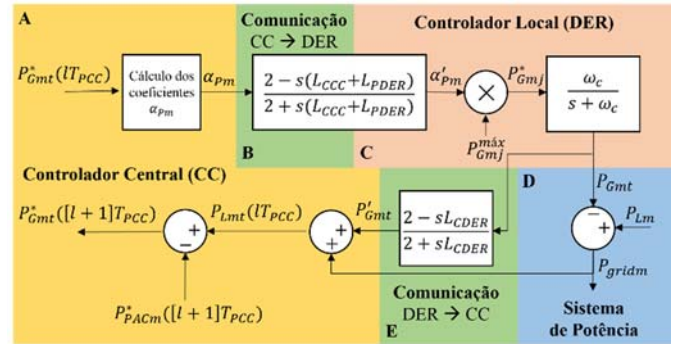


Fig. 4. Modelo contínuo do controle centralizado de uma MR.

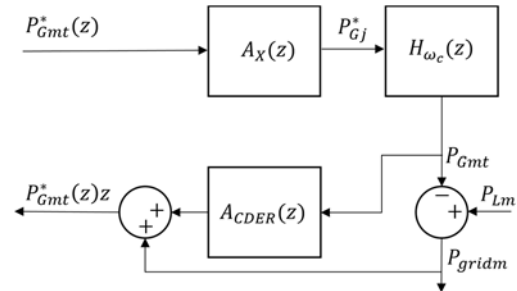


Fig. 5. Modelo discreto do controle centralizado de uma MR.

O algoritmo PBC é continuamente processado dentro de um intervalo de processamento do CC (T_{PCC}). O parâmetro $\omega_c = 2\pi f_c$ é a largura de banda do filtro passa baixa utilizado para modelar a malha externa de controle de potência do controlador local do DER. A latência da comunicação designada por L_{CCC} refere-se ao tempo máximo necessário para o envio do pacote de controle contendo o coeficiente α_{pm} pelo CC para o DER. A latência da comunicação designada por L_{CDER} refere-se ao tempo máximo necessário para que o DER envie o valor de sua potência injetada na rede (P_{Gmt}) para o CC. A latência de processamento do DER é definida por L_{PDER} . Em A, o CC estima a potência consumida pela MR (P_{Lmt}) somando a informação atrasada da potência injetada pelo DER na MR (P'_{Gmt}) com a potência ativa medida no PAC no lado da rede elétrica (P_{gridm}). Na sequência, o CC obtém o valor da nova potência a ser injetada na microrrede pelo DER (P^*_{Gmt}), subtraindo a referência de potência desejada no PAC no lado da rede elétrica (P^*_{PACm}) da estimativa P_{Lmt} . O coeficiente α_{pm} é então calculado no CC dividindo-se P^*_{Gmt} pela disponibilidade total de potência ativa do DER conectado na fase m (P^{max}_{Gmt}). Para fins de simplificação, considerou-se P^{max}_{Gmt} constante e conhecido pelo CC. O coeficiente α_{pm} é então enviado ao DER chegando ao destino em C depois de um atraso total de $L_{CCC} + L_{PDER}$ modelado em B e em C, sendo designado neste ponto por α'_{pm} . Em C, O DER calcula a nova referência de potência ativa a ser injetada pelo seu controlador local na microrrede (P^*_{Gmj}) através do produto entre α'_{pm} e sua disponibilidade local de potência (P^{max}_{Gmj}). A potência P^*_{Gmj} é então aplicada ao filtro passa baixa do controlador local. A saída do filtro é a potência ativa injetada pelo DER na MR em D, resultando na potência total injetada na MR uma vez que só há um DER no modelo, designada por P_{Gmt} . A potência P_{Gmt} é novamente enviada pelo DER para o CC chegando ao destino em A depois do atraso L_{CDER} modelado em E, sendo designada

neste ponto por P'_{Gmt} . Em **A**, o CC estima novamente a potência P_{Lmt} somando P'_{Gmt} com P_{gridm} e o processo se repete. No Sistema de Potência em **D**, P_{gridm} refere-se a potência que de fato é injetada pela rede elétrica no PAC para suprir a demanda de potência dada por $P_{Lm} - P_{Gmt}$ que, idealmente, deve ser igual a referência P_{PACm}^* .

A Fig. 5 apresenta o modelo discreto do sistema da Fig. 4, construído para a obtenção da função de transferência discreta entre a potência ativa total por fase absorvida pela MR (P_{Lm}) e a referência de potência ativa total por fase a ser injetada pelos geradores distribuídos (P_{Gmt}^*). A referência de potência P_{PACm}^* definida pelo controle terciário pode ser omitida do modelo discreto devido a sua lentidão na atualização se comparada a dinâmica do modelo. Também foram omitidos os cálculos dos coeficientes e o produto por P_{Gmj}^{max} no modelo discreto por serem operações lineares com valores constantes que se neutralizam, não interferindo na análise de estabilidade do sistema. As funções discretas A_X , H_{ω_c} e A_{CDER} são resultados das transformadas Z com tempo de amostragem T_{PCC} das funções contínuas, que representam, respectivamente, o atraso $L_{CCC} + L_{PDER}$, a malha de potência do controlador local e o atraso L_{CDER} . Sendo assim, é possível obter a função de transferência discreta $P_{Gmt}^*(z)/P_{Lm}(z)$ da seguinte forma

$$\frac{P_{Gmt}^*(z)}{P_{Lm}(z)} = \frac{1}{z + A_X(z)H_{\omega_c}(z)(1 - A_{CDER}(z))} \quad (1)$$

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Com o objetivo de avaliar a influência de T_{PCC} e do atraso de comunicação $L_{Com} = L_{CCC} = L_{CDER}$ na estabilidade do sistema da Fig.4, foram obtidos os polos e zeros da função discreta da equação (1) para os dois cenários de simulação considerando $L_{PDER} = 0$ e $f_c = 15$ Hz. A latência de processamento do DER foi desprezada pois ser muito pequena se comparada a latência de comunicação. Já a frequência de corte foi adotada como 15 Hz pois é um valor em que as respostas de magnitude e de fase do filtro passa baixa de primeira ordem ficam iguais às do filtro média móvel (Golestan *et al*, 2014), o permite usar o filtro passa baixa na modelagem do filtro média móvel. Seguem os cenários de simulação:

- *Cenário 1:* T_{PCC} fixo e L_{Com} variável;
- *Cenário 2:* L_{Com} fixo e T_{PCC} variável.

5.1 Cenário 1 - L_{Com} variável

No primeiro cenário de simulação, apresentado na Fig 6, T_{PCC} e f_c foram estabelecidos em 16,67 ms e 15 Hz, respectivamente, enquanto que o atraso de comunicação L_{Com} variou de 1,667 a 166,7 ms, em passos de 1,667 ms. A Fig. 6 mostra o plano Z com os polos e zeros da função de transferência (1) para cada ponto simulado. Pode-se constatar que o sistema é estável para valores de $L_{Com} \leq 18,33$ ms. A medida em que o valor de L_{Com} aumenta, os polos aproximam-se da fronteira do círculo unitário, aumentando-se também o tempo de acomodação da resposta temporal transitória do sistema ao degrau unitário. O sistema torna-se instável para valores de $L_{Com} > 18,33$ ms. Os casos 1 e 2 em destaque na Figura 6 correspondem respectivamente à exemplos de situações de estabilidade (polos dentro do círculo unitário) e instabilidade (polos fora do círculo unitário) da MR.

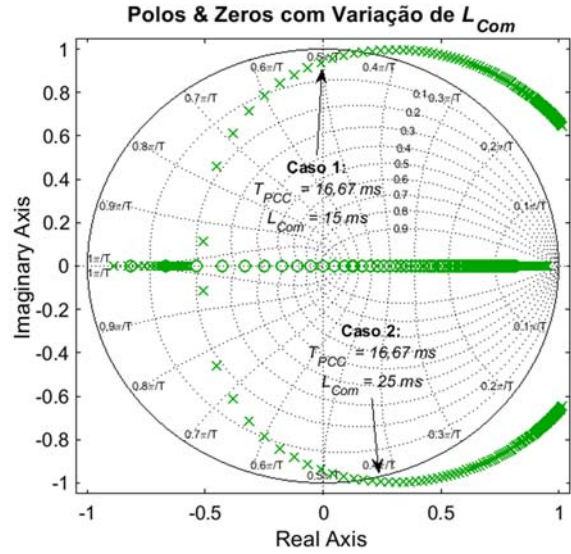


Fig. 6 Plano Z com polos (x) e zeros (o) do Cenário 1.

As Figs. 7 e 8 apresentam as simulações temporais dos casos 1 e 2 do modelo no Simulink (detalhes na seção 5.4). As potências foram definidas inicialmente em $P_{PACm}^* = 5$ kW e $Q_{PACm}^* = 0$ kVar, sendo modificados para 5,5 kW em 3 s.

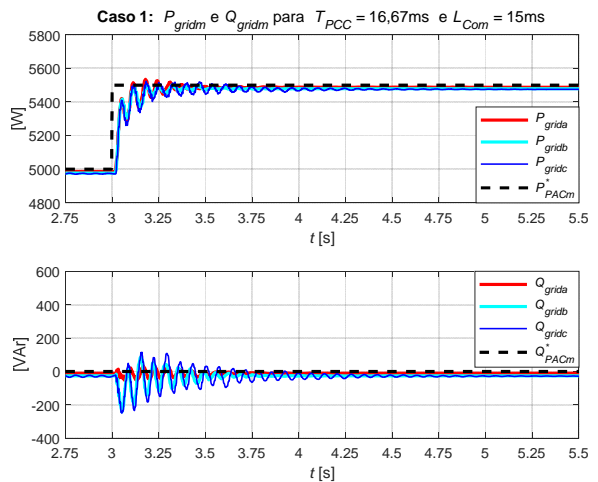


Fig. 7 P_{gridm} e Q_{gridm} no Caso 1: $T_{PCC}=16,67$ ms e $L_{Com}=15$ ms.

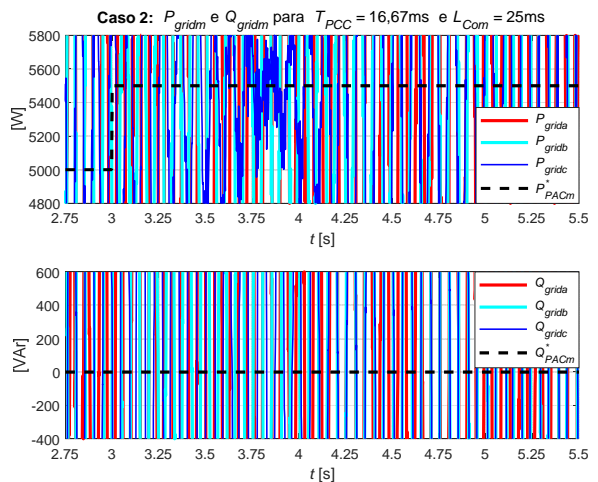


Fig. 8 P_{gridm} e Q_{gridm} no Caso 2: $T_{PCC}=16,67$ ms e $L_{Com}=25$ ms.

Note no sistema da Fig. 7 que as potências convergem para os valores pré-definidos no PAC. Observe que há uma oscilação de potência reativa que ocorre devido ao acoplamento cruzado provocado pelas impedâncias sérias na linha. Na Fig. 8 o sistema é instável. Note que não haveria convergência para nenhuma das TCs apresentadas na Tabela 1 no Cenário 1 por possuírem atrasos máximos maiores do que 18,33 ms.

5.2 Cenário 2 - T_{PCC} variável

A Figura 9 apresenta todos os polos e zeros obtidos no plano Z, referente à todas as funções discretas analisadas no segundo cenário de simulação. No segundo cenário, L_{Com} e f_c foram estabelecidos em 25 ms e 15 Hz respectivamente, enquanto que o tempo de processamento T_{PCC} variou de 25 ms a 166,7 ms, em passos de 1,667 ms. Para cada valor de T_{PCC} , obteve-se uma função de transferência discreta pela equação (1) e seus respectivos polos e zeros. De acordo com a Fig. 9, o sistema deve manter a sua estabilidade para valores de $T_{PCC} \geq 75$ ms. Nos casos de estabilidade, o tempo de acomodação da resposta temporal transitória do sistema ao degrau unitário diminui à medida que aumenta T_{PCC} .

Os casos 2 (mesmo da Fig.6) e 3 ($T_{PCC} = 83,33$ ms) especificamente correspondem à situações de instabilidade e estabilidade respectivamente. A Fig. 10 apresenta a convergência do controle no PAC nas condições do Caso 3 em $P_{PACm}^* = 5$ kW e $Q_{PACm}^* = 0$ kVAr, sendo modificados para 5,5 kW e 0 kVAr em 3 s. Note que, tanto no cenário 1 quanto no 2 de análise, a estabilidade foi atingida para valores de $T_{PCC} > L_{Com}$. Essa condição era esperada, uma vez que o CC deve dar tempo para que os atrasos ocorram antes de realizar uma nova interação do algoritmo PBC, para que essa nova interação aconteça com os dados atualizados.

5.3 Comparação: modelo discreto e modelo do Simulink

Para comparar o modelo do Simulink com o modelo discreto, foram obtidas suas respostas ao degrau unitário nas condições do Cenário 1 de operação. Para a avaliação, foi calculado o erro quadrático médio entre as respostas, do inglês *Mean Squared Error* (MSE). O MSE entre os sinais X e Y para n amostras pode ser calculado por (2)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \quad (2)$$

A Fig. 11 apresenta as repostas ao degrau para o Caso 1, com MSE igual a 0,0213. Note que as duas respostas apresentam similaridades. A resposta ao degrau do modelo do Simulink (em linha contínua grossa) possui um *overshoot* de 11,45 % e tempo de acomodação de 0,6 s. Já a resposta ao degrau do modelo discreto (em linha contínua fina), possui um *overshoot* de 18,8 % e tempo de acomodação de 0,83s. A Fig. 12 apresenta uma curva com os resultados dos MSEs calculados entre as respostas do modelo discreto e da simulação do Simulink para o Cenário 1, em que $T_{PCC} = 16,67$ ms e $1,67$ ms $\leq L_{Com} \leq 15$ ms. Note que o MSE se mantém entre 0,012 e 0,024 para todos os valores de L_{Com} , indicando uma correlação entre os modelos. Destaca-se que o cálculo do MSE foi realizado considerando como janela de tempo o maior tempo de acomodação entre as respostas ao degrau do modelo discreto e do Simulink.

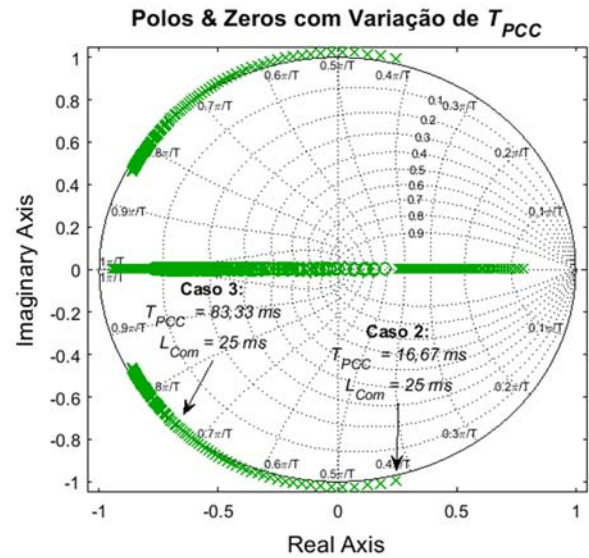


Fig. 9 Mapa de polos (x) e zeros (o) para Cenário 2.

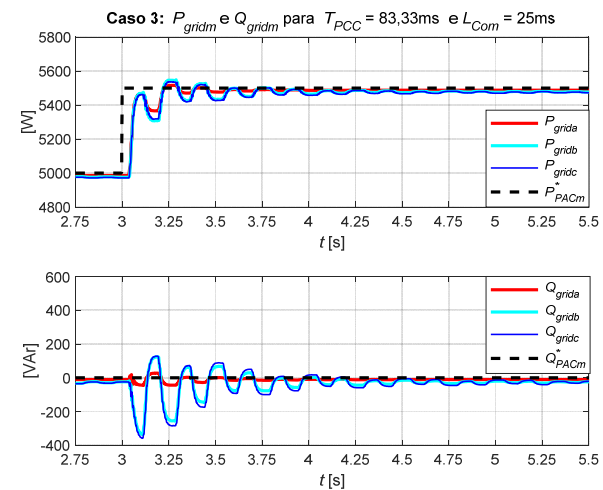


Fig. 10 P_{gridm} e Q_{gridm} para Caso 3: $T_{PCC}=83,33$ ms e $L_{Com}=25$ ms.

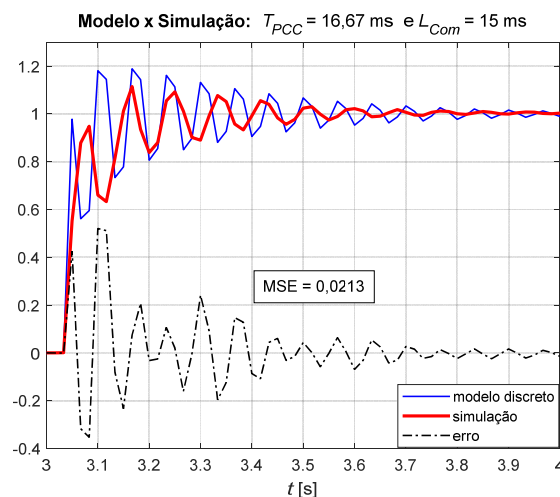


Fig. 11 Respostas ao degrau unitário para o Caso 1.

5.4 Estabilidade das comunicações

Com auxílio computacional dos modelos do Simulink e discreto, buscou-se encontrar os valores de $T_{PCC,min}$ capazes

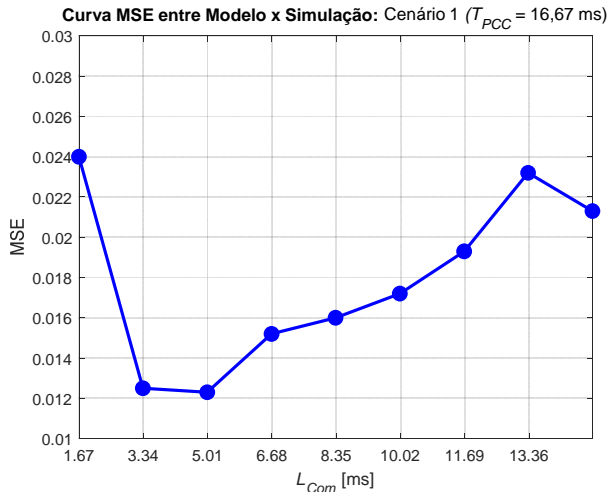


Fig. 12 MSE: ($T_{PCC} = 16,67$ ms e $1,67$ ms $\leq L_{Com} \leq 15$ ms).

de estabilizar o sistema considerando os atrasos máximos relacionados às diferentes TCs sem fio. A Fig. 13 mostra um diagrama simplificado do modelo do Simulink implementado. Os blocos indicados com as letras **A**, **B**, **C**, **D** e **E** apresentam as mesmas funções das etapas indicadas com as mesmas letras no modelo discreto da Fig.4. O Sistema de Potência (**D**) e os DERs (**E**) devem ser implementados para representar a MR da Fig.2. O medidor de potência calcula as potências ativas e reativas no lado da rede do PAC a partir das tensões V e correntes I e enviam os resultados para o CC (**C**). O bloco OSD ou OMR define as referências de potência a serem estabelecidas no PAC. Os blocos de atraso de comunicação (**B** e **E**) implementam os atrasos $L_{C_{DER}}$ e $L_{C_{CC}}$. O CC processa os dados a cada intervalo de tempo T_{PCC} . Os resultados estão apresentados na Tabela 2. Para definir o atraso da tecnologia LoRa, considerou-se um *payload* de 24 Bytes para transmitir do CC para o DER e 20 Bytes do DER para o CC de acordo com a Fig. 3 (4 Bytes por informação). Pelo gráfico da Fig. 1, com modulação SF = 7, obteve-se uma latência de 100 ms.

A Fig. 14 apresenta a operação da MR com a tecnologia LoRa, definida inicialmente para operar em $P_{PAC}^* = 5$ kW e $Q_{PAC}^* = 0$ kVar, modificados para 5,5 kW e 0 kVar em 3 s.

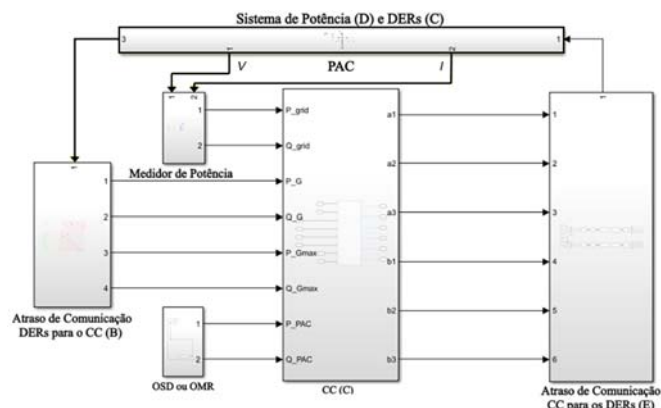


Fig. 13 Diagrama simplificado do modelo do Simulink

Tabela 2. Combinações de estabilidade da microrrede.

Tecnologia	HSPA	LTE	LoRa	Zigbee
L_{Com} (ms)	26	40	100	140
$T_{PCC,min}$ (ms)	78	120	300	420

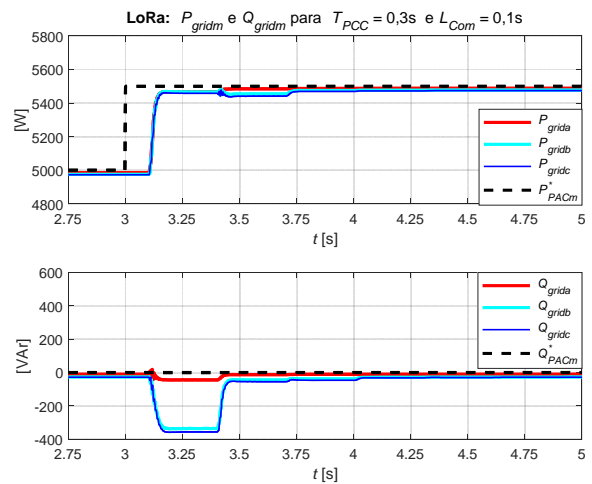


Fig. 14 P_{gridm} e Q_{gridm} para LoRa: $T_{PCC}=0,3s$ e $L_{Com}=0,1s$.

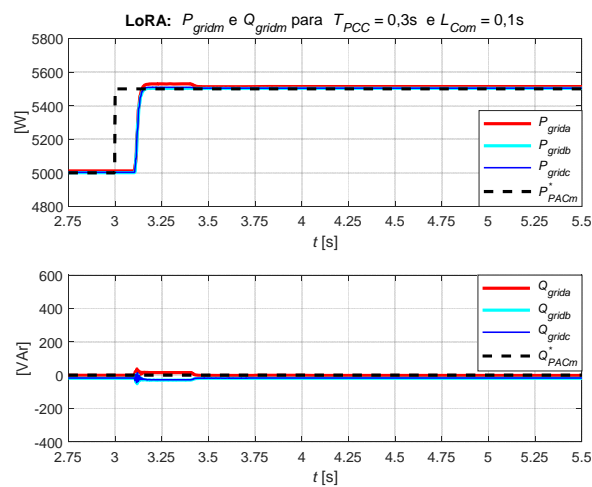


Fig. 15 P_{gridm} e Q_{gridm} para LoRa: $T_{PCC}=0,3s$ e $L_{Com}=0,1s$.

Note que o sistema encontra-se em regime permanente de 2,75 s até aproximadamente 3,1 s. Depois o sistema tem uma variação de potência ativa nas fases devido à mudança de referência no PAC em 3 s. A MR atinge novamente o regime permanente em aproximadamente 4 s. Há uma variação de potência reativa em 3,1 s que depois é corrigida pelo próprio algoritmo PBC em 3,4 s. Essa variação está relacionada ao acoplamento cruzado causado pelas impedâncias séries e presença de cargas indutivas que modificam a potência reativa devido a mudança do perfil de tensão provocada pela variação do fluxo de potência ativa. A Fig. 15 apresenta a mesma análise da Fig. 14 porém com impedâncias séries reativas menores. Note que a variação de potência reativa na Fig. 15 é bem menor do que na Fig. 14.

6. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado contribui para o avanço das pesquisas sobre o uso de sistemas de comunicações em MRs operando com controle centralizado, pois, através de simulações e modelagem matemática, avalia como a latência da comunicação interfere na estabilidade do sistema. Além disso, o trabalho analisa a viabilidade de utilização de TCs sem fio conhecidas como LoRa, LTE e Zigbee no controle da MR considerando a suas máximas latências de comunicação.

Para $T_{PCC} = 16,67$ ms e $f_C = 15$ Hz, o sistema estabiliza quando $L_{Com} \leq 18,33$ ms. Já para $L_{Com} = 25$ ms e $f_C = 15$ Hz, o sistema se estabiliza quando $T_{PCC} \geq 75$ ms. A viabilidade do uso de TCs sem fio para a operação estável de uma MR com controle centralizado depende do intervalo mínimo de processamento do controlador central ($T_{PCC,min}$). Os valores de $T_{PCC,min}$ obtidos em simulação que estabilizaram a MR operando com HSPA, LoRa, LTE e Zigbee em seus atrasos máximos foram respectivamente 78 ms, 120 ms, 300 ms e 420 ms.

Como continuidade dos estudos, sugere-se o aprimoramento dos modelos, buscando por exemplo formas alternativas de modelar o atraso e adicionando os diversos caminhos e atrasos de comunicação entre os DERs e o CC. Propõe-se também a validação dos resultados de simulação com experimentos práticos, utilizando as TCs adotadas no trabalho. Por fim, sugere-se analisar os impactos da latência na estabilidade de estratégias de controle distribuído.

REFERÊNCIAS

- Adelantado, P. F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J. and Watteyne, T. (2017). Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40.
- Barradas, H. M. (2018). Análise do impacto da inserção massiva de geração distribuída fotovoltaica nos níveis de curto-circuito em redes de distribuição de energia elétrica. *Tese de Doutorado*. Universidade Estadual Paulista.
- Brandao, D. I. (2015). Coordinated power-based control and utility interface converter in low voltage microgrids, *Tese de Doutorado*, Universidade Estadual de Campinas.
- Brandao, D. I., et al. (2019). Coordinated control of distributed three-and single-phase inverters connected to three-phase three-wire microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 8.4: 3861-3877.
- Caldognetto, T., Buso, S., Tenti, p., and Brandao, D. I. (2015). Power-based control of low-voltage microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(4):1056-1066.
- Da Costa, A. M. G., and Uturbey, W. (2017). Voltage regulation strategies for distributed PV generation. *IEEE Manchester PowerTech*.
- De Melo Leite, L. H. (2016). Estratégia de regulação de tensão em redes de distribuição com geração distribuída fotovoltaica assistida por infraestrutura integrada de telecomunicações. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Dos Santos Alonso, A. M., et al. (2019). Considerations on communication infrastructures for cooperative operation of smart inverters. 2019 *IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*.
- Golestan, S., Ramezani, M., Guerrero, J. M., Freijedo, F. D., Monfared, M. (2014). Moving Average Filter Based Phase-Locked Loops: Performance Analysis and Design Guidelines, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2750-2763, June 2014. IEEE (2018). IEEE Standard 1547 for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, *IEEE 1547 Std*.
- Jamborsalamati, P., et al. (2018). MQTT-based resource allocation of smart buildings for grid demand reduction considering unreliable communication links. *IEEE Systems Journal* 13.3: 3304-3315.
- Kang, Ning, et al. (2017). Interconnection, integration, and interactive impact analysis of microgrids and distribution systems. No. ANL/ESD-17/4. *Argonne National Lab.* (ANL), Argonne, IL (United States).
- Naruto, T.D. (2017). Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. *Monografia de Graduação*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Saleh, M., Esa, Y., Hariri, M.E., Mohamed, A. (2019). Impact of Information and Communication Technology Limitations on Microgrid Operation. *Energies*.
- Ton, D. T. and Smith, M. A., (2012). The us department of energy's microgrid initiative, *The Electricity Journal*, vol. 25, no. 8, pp. 84-94, 2012.

Apêndice A. CONTROLE BASEADO EM POTÊNCIA

A interação entre o controlador central e os DER ocorrida na estratégia de controle centralizado baseado em potência (PBC) está apresentada a seguir:

1. O CC recebe de cada j -ésimo DER um pacote de informações contendo as disponibilidades de potência ativa e reativa locais ($P_{Gmj}^{min}(l)$, $P_{Gmj}^{max}(l)$ e $Q_{Gmj}^{max}(l)$) e as potências ativa e reativa injetadas na rede ($P_{Gmj}(l)$ e $Q_{Gmj}(l)$) conforme ilustra a Fig. 3, em que m indica a fase onde o j -ésimo DER injeta potência na MR.
2. Com base nas informações recebidas pelos DERs, nas medidas de potência ativa e reativa por fase no lado da rede no PAC ($P_{gridm}(l)$ e $Q_{gridm}(l)$) e nas novas referências desejadas de fluxos de potência ativa e reativa por fase no PAC ($P_{PACm}^*(l+1)$, $Q_{PACm}^*(l+1)$) determinadas por um controle de nível terciário, o CC calcula as novas referências de potência ativa e reativa por fase totais a serem fornecidas pelo conjunto de DERs ($P_{Gmt}^*(l+1)$, $Q_{Gmt}^*(l+1)$) e também um par de coeficientes (α_{Pm} e α_{Qm}) para cada fase m . Na sequência, o CC envia um único pacote de controle para todos os DERs (*broadcast*), contendo todos os coeficientes α_{Pm} e α_{Qm} calculados, conforme ilustra a Fig. 3;
3. Cada DER recebe o pacote enviado pelo CC com os coeficientes α_{Pm} e α_{Qm} relacionados à fase de interesse e calcula as novas potência ativas e reativas locais ($P_{Gmj}^*(l+1)$ e $Q_{Gmj}^*(l+1)$) a serem injetadas pelo DER na MR.

O resultado da repetição desse processo é uma divisão precisa e proporcional da potência ativa e reativa injetada por cada DER, atingindo o principal objetivo, que é o controle de potência no PAC.