

Estudos Preliminares da Microrrede CAMPUSGRID usando PSCAD/EMTDC

Anna D. E. F. Rocha, Amiron W. dos S. Serra, Patrícia de S. Santos *
Lucas de M. C. França, Silvangela L. da S. L. Barcelos *
Osvaldo R. Saavedra * Rafael G. Bento **

* *Universidade Federal do Maranhão, MA, (e-mail: anna.dulce,
amiron.wolff,santos.patricia1, lucas.melo@discente.ufma.br;
silvangela.barcelos, osvaldo.saavedra@ufma.br).*

** *CPFL Energia Campinas, SP, (e-mail:rafaelbento@cpfl.com.br).*

Abstract: Microgrids are basically composed of dispatchable and distributed generation, storage system and loads. They must be able to guarantee a stable supply of energy to the loads, being able to operate in connected or islanded mode in relation to the energy utility. Studies to evaluate the Electric Power Quality indices must be carried out for different operating conditions. In this paper, a modeling of the distribution grid of the CAMPUSGRID microgrid using PSCAD/EMTDC software are presented. Simulation results of different load profiles, load connection/disconnection scenarios and intermittent generation integration are presented.

Resumo: Microrredes são compostas basicamente por geração despachável e distribuída, sistema de armazenamento e cargas. Devem ser capazes de garantir o fornecimento estável de energia às cargas, podendo operar em modo conectado ou ilhado em relação à concessionária de energia. Estudos para avaliar os índices de Qualidade de Energia Elétrica devem ser realizados para diferentes condições de operação. Neste artigo é apresentada a modelagem preliminar da rede de distribuição da microrrede CAMPUSGRID através do software PSCAD/EMTDC. Esta microrrede está em fase de implementação numa área do campus universitário da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Resultados de simulação de diferentes perfis de carregamento, cenários de conexão/desconexão de cargas e integração da geração intermitente são apresentados e discutidos.

Keywords: Microgrid; Photovoltaic generation; Operational Scenarios; Distribution Grid.

Palavras-chaves: Microrrede; Geração fotovoltaica; Cenários Operacionais; Rede de Distribuição.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de microrrede vem do uso da geração distribuída baseada em fontes renováveis para suprir cargas localmente. Conforme Bellido et al. (2018), uma microrrede é basicamente composta por geração distribuída, sistema de armazenamento de energia (*Battery Energy Storage System-BESS*), geração despachável (Diesel ou gás) e cargas que podem ser residenciais, comerciais e industriais.

As microrredes podem ainda ser entendidas como a implementação efetiva de redes inteligentes, que possuem funcionalidades para gestão de energia, como controle de tensão, frequência e gerenciamento de demanda, podendo operar também em modo conectado ou isolado em relação aos recursos das concessionárias, Quadros et al. (2021). Consistem em uma variedade de recursos energéticos, tais como fontes renováveis de geração, sistemas de armazenamento, pontos para carregamento de veículos elétricos e geração distribuída, Souza and Castilla (2019)

Os modos de operação de uma microrrede, modo conectado e modo ilhado (Soshinskaya et al. (2014)), juntamente com as fontes de geração baseadas em fontes re-

nováveis fazem com que os consumidores não dependam integralmente da rede da concessionária local, permitindo o atendimento a cargas de áreas rurais ou remotas. O que estabelece um cenário de geração distribuída, sem a necessidade de longas linhas de transmissão, com menores perdas e maior confiabilidade.

Em Bahrami and Mohammadi (2019), os autores mencionam que dentre as motivações para a implementação de microrredes em locais que já são atendidos por concessionárias de energia estão a possibilidade de integração de fontes renováveis e os benefícios econômicos decorrentes do modelo de operação desse tipo de rede elétrica. Tais benefícios têm motivado a implementação de microrredes também em metrópoles urbanas devido a possibilidade de melhoria nos índices de confiabilidade no fornecimento de energia, além do baixo impacto ambiental (Quadros et al. (2021)).

Estudos sobre microrredes têm sido desenvolvidos com o intuito de permitir um melhor atendimento a consumidores com os mais diferentes perfis, por exemplo consumidores residenciais, comerciais, de instituições de educação e militares, assim como de localidades remotas (Bellido et al.

(2018) Barcelos et al. (2019), Soshinskaya et al. (2014)). Neste contexto, pode-se citar os estudos que objetivam a obtenção de modelos de simulação (Barcelos et al. (2019), Barcelos et al. (2020)), que contemplem a representação do mix de geração, da rede de distribuição e das cargas atendidas, permitindo assim, a caracterização da operação da microrrede e a realização de análises de sua operação em diferentes cenários, por exemplo, em que são consideradas injeções de potência pelas fontes de geração ao longo da Microrrede, em que modos de operação distintos são assumidos ou mesmo os cenários em que ocorram variações no perfil de carga intencional (corte de carga) ou por conta do perfil dinâmico de consumo da microrrede.

A microrrede CAMPUSGRID faz parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (*P&D*) financiado pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), tendo como um dos objetivos o desenvolvimento/implementação de uma microrrede incluindo a segmentação de cargas em baixa tensão (circuitos elétricos de prédios administrativos do CAMPUS) e média tensão (ilhamento da rede principal), UNICAMP (2019). O projeto está sendo executado por pesquisadores de UFMA, UNICAMP e IATI.

De acordo com o módulo 8 dos Procedimentos para Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), ANEEL (2021a), uma microrrede como a CAMPUSGRID deve formar uma rede que atenda aos critérios de qualidade da energia elétrica estabelecidos para sistemas de distribuição convencionais, sendo necessário atender a diferentes cenários operacionais que mantenham a qualidade do fornecimento de energia às cargas.

Neste artigo, são apresentados os resultados de análise do desempenho da rede elétrica que fará parte da CAMPUSGRID através de uma representação no software PSCAD/EMTDC. Esta modelagem permitirá analisar dinamicamente a rede de distribuição dessa microrrede, em cenários em que injeções de potência da geração fotovoltaica (Sistema FV) existente no telhado do GMU (Ginásio Multidisciplinar) são consideradas, além de variações no perfil de carregamento. Nesta fase inicial de estudos com a CAMPUSGRID, considera-se um modelo simplificado para a geração fotovoltaica através de injeções de partir de fontes de correntes controladas capazes de representar diferentes perfis de geração, Tal simplificação é considerada tendo em vista que o foco principal do estudo é a análise do desempenho da rede elétrica de distribuição.

O PSCAD / EMTDC é uma ferramenta de simulação padrão da indústria para estudar e analisar o comportamento transitório de redes elétricas, PSCAD (2021) .

A organização do artigo é a seguinte: A seção 2 apresenta a caracterização da CAMPUSGRID; O detalhamento da modelagem realizada para representar rede e fontes da microrrede é apresentado na seção 3. As características da modelagem realizada no PSCAD/EMTDC para representar a rede e o Sistema FV equivalente são apresentadas na Seção 4. Os resultados do desempenho dinâmico da rede elétrica que fará parte da CAMPUSGRID são apresentados na Seção 5. Finalmente, são apresentadas as conclusões na Seção 6.

2. CARACTERIZAÇÃO DA MICRORREDE CAMPUSGRID

A microrrede CAMPUSGRID está sendo implantada no campus da UNICAMP em Barão Geraldo, Campinas-SP, e será a maior microrrede a ser implantada em uma universidade no Brasil López et al. (2020). Ela abrange o Ginásio Multidisciplinar (GMU), a Faculdade de Educação Física (FEF), a Biblioteca de Obras Raras (BORA) e a Biblioteca Central César Lattes (BC). Também considera uma usina de geração fotovoltaica, distribuída em segmentos incluindo o telhado do GMU e prédios da área da Faculdade de Educação Física. Considera também uma estação de carregamento de ônibus elétrico, um gerador a gás natural e um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias UNICAMP (2019). Na Figura 1 é apresentada a composição proposta para a CAMPUSGRID.

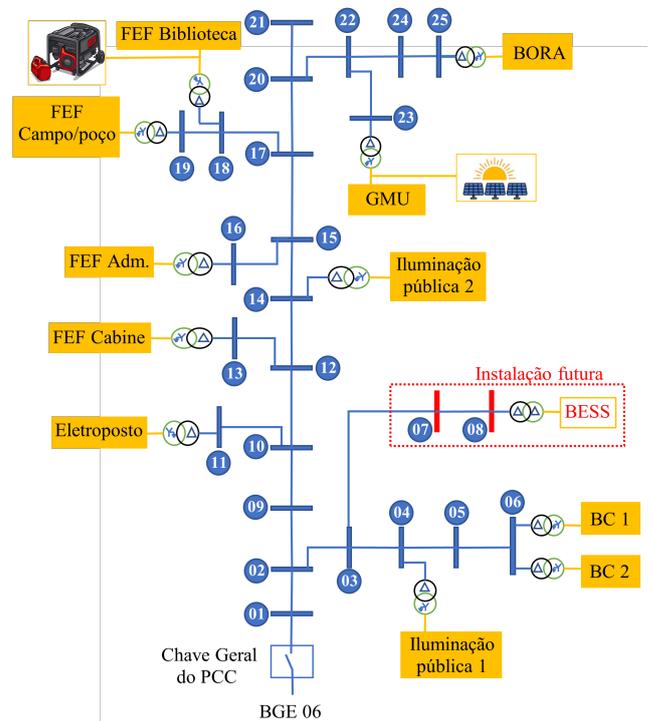


Figura 1. CAMPUSGRID: Diagrama de barras/nó.

A microrrede em questão segue o modelo de barramento comum em corrente alternada. Este papel é realizado pelo alimentador trifásico BGE06, com tensão nominal de 11,9 kV (Linha-Linha), que após ser segmentado por uma chave de conexão /desconexão (Ponto de conexão da microrrede com a rede externa), atenderá as cargas à microrrede. Conforme mostrado neste diagrama, as cargas são alimentadas por meio de 11 transformadores com capacidade nominal entre 45 e 300 kVA, totalizando uma potência instalada da ordem de 2370 kVA. A rede interna a ser atendida pelo mix de geração da CAMPUSGRID é composta por 25 nós. Os nós 4,6,11,18,19, 23 e 25 representam pontos de conexão com cargas/prédios e geração. O nó 8 será conectado ao sistema de armazenamento. Os demais nós são derivações ou mudanças no tipo de condutores.

Conforme mencionado em ANEEL (2021b), o ponto em que é estabelecida a conexão entre as instalações as concessionária e a microrrede é definido como ponto de conexão

comum (PCC). Na CAMPUSGRID, o PCC encontra-se no nó 1.

2.1 Cargas/Prédios a serem atendidos pela microrrede

Além da FEF, GMU, BORA e a BC, a CAMPUSGRID atenderá também cargas de iluminação pública e o Eletroposto para carregamento de veículos. A conexão dos prédios/cargas com a rede de média tensão em 11,9 kV da microrrede é realizada através de transformadores de potência (com conexão Δ/Y) cujas principais características são apresentadas na Tabela 1. As instalações em baixa tensão são atendidas em 220/127 V, com exceção do Eletroposto, que será atendido em 380/220 V.

Tabela 1. Características dos transformadores.

Local/Edificação	V_p (kV)	V_s (V)	S (kVA)	Z (%)
BC 01	11,9	220/127	300	4,53
BC 02	11,9	220/127	300	4,53
Iluminação pública 01	11,9	220/127	45	2,94
Eletroposto	11,9	380/220	112,5	3,50
FEF Cabine/quadras	11,9	220/127	112,5	3,49
Iluminação pública 02	11,9	220/127	75	3,52
FEF administrativo	11,9	220/127	300	4,58
FEF Biblioteca	11,9	220/127	225	4,54
FEF campo/poço	11,9	220/127	300	4,81
GMU	11,9	220/127	300	4,56
BORA	11,9	220/127	300	4,58

2.2 Legado de fontes de geração

Na área de microrrede já existe um sistema fotovoltaico operativo instalado no GMU e um gerador a diesel de baixa capacidade para fins de *backup*, conforme figura 1. O gerador a diesel, modelo J40UW da SDMO - MAQUIGERAL, possui potência nominal de 50 kVA e encontra-se conectado ao barramento da FEF-Biblioteca. Opera em frequência igual a 60 Hz e tensão nominal de 220/127 V. Por ser um gerador de *backup*, não fará parte da representação de rede proposta.

O gerador fotovoltaico instalado no telhado do GMU será integrado à matriz de geração da microrrede. Ele é composto por 5 conversores *INGECON SUN 3Play 100 TL* conectados na rede CA em 220/127 V, totalizando 275 kW. Os painéis fotovoltaicos são de 270 W_p cada, modelo *CS6K-270* da fabricante *CANADIAN SOLAR*. São 1248 painéis instalados, totalizando 336,96 kW_p .

2.3 Fontes de geração do microrrede

A microrrede considera as seguintes fontes de geração e armazenamento:

- Gerador a gás natural.
O gerador a gás será uma fonte despachável complementar aos geradores fotovoltaicos. Pretende-se instalar no prédio administrativo da FEF. Potência nominal em regime contínuo igual a 150 kW.
- Gerador fotovoltaico.
Considera-se como ponto de partida o gerador fotovoltaico legado em funcionamento no GMU. Além disso, está prevista a ampliação da geração FV em aproximadamente 400 kW_p , cuja instalação será dividida em alguns prédios da Faculdade de Educação Física.

- A rede da Concessionária.
Quando a microrrede operar em modo “on-grid”, a fonte de referência será a concessionária de energia elétrica.
- Sistema de Armazenamento.
O sistema armazenamento especificado terá capacidade de armazenamento igual a 810 kWh. Será composto por baterias de Íon - Lítio LFP e terá conexão com a rede de média tensão através de transformador de acoplamento como ilustrado na figura 1.

3. MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO E FONTES

A representação considerada nesta primeira fase de estudos de simulação dinâmica da CAMPUSGRID engloba os diferentes trechos da rede de distribuição, as cargas/prédios atendidos pela microrrede e seus respectivos transformadores de acoplamento com a rede de média tensão, bem como o Sistema PV. Neste estudo, a rede elétrica de média tensão externa à microrrede é representada através do equivalente de Thevenin visto a partir do PCC. Os valores de resistência e reatância que compõem a impedância de Thevenin foram obtidos com base nos relatórios de curto-circuito que consideram o trecho dessa rede de distribuição até o PCC da CAMPUSGRID, Souza (2022).

3.1 Modelagem, através da impedância longitudinal, dos trechos da rede de distribuição da microrrede

Apesar dos fabricantes de condutores fornecerem os *datasheets*, as características elétricas desses condutores dependem, muitas vezes, de sua geometria. Por esse motivo, optou-se por realizar os cálculos das linhas de distribuição considerando suas características dimensionais e elétricas, bem como as normas técnicas associadas à Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), CPFL (2022), CPFL (2017) e CPFL (2018). Os condutores elétricos que formam a rede de distribuição da área a ser atendida pela CAMPUSGRID possuem as características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos cabos presentes na CAMPUSGRID.

Tipo de Cabo	Secção Transversal	Tipo de Rede	Material Condutor
Cabo NU	4/0 AWG	Aérea Convencional	Alumínio
Cabo Coberto	70 mm^2	Aérea Compacta	Alumínio
Cabo Coberto	185 mm^2	Aérea Compacta	Alumínio
Cabo Isolado	25 mm^2	Subterrânea Isolada	Cobre

Cabo Isolado (Cu) [25 mm^2]: A partir das características dimensionais e elétricas do cabo isolado de cobre 25 mm^2 presentes no manual do fabricante NEXANS (2018b), pode-se determinar o valor de indutância (L) através de (1), em que X_L é a reatância indutiva e f é a frequência do sistema elétrico (60 Hz):

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (1)$$

Cabo NU (Al) [4/0 AWG]: A partir das características dimensionais e elétricas do cabo NU de Alumínio 4/0 AWG NEXANS (2018a), pode-se determinar o valor de indutância através de (2) em H/m, em função da distância média geométrica (D_M) e do raio médio geométrico (D_S).

$$L = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D_M}{D_S} \quad (2)$$

D_M depende da geometria do cabo e pode ser calculado por:

$$D_M = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \quad (3)$$

Em que, D_{12} , D_{23} e D_{31} correspondem às distâncias entre condutores do cabo.

Cabo Coberto (Al): A partir das características dimensionais e elétricas do cabo coberto de Alumínio NEXANS (2018c) e NEXANS (2018d), pode-se determinar o valor de indutância através de (2). Para os cabos de Alumínio do tipo coberto de 70 mm^2 e de 185 mm^2 , formados por 1 condutor, foram usados espaçadores losangulares de 15 kV, que apresentam geometria de um triângulo equilátero de lado $l=0,15$ m. O valor de D_S , para ambos, é dado por:

$$D_S = r_a * e^{-\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Sendo, r_a o raio do condutor. Em resumo, a Tabela 3 apresenta os valores de indutância, reatância e resistência dos condutores da rede de distribuição da CAMPUSGRID.

Tabela 3. Características elétricas dos condutores da CAMPUSGRID.

Secção Transversal	RCA (Ω/km)	L ($\mu\text{H}/\text{m}$)	X_L (Ω/km)
25 mm^2	0,9710	0,4190	0,158
4/0 AWG	0,3280	1,0850	0,409
70 mm^2	0,5682	0,7372	0,292
185 mm^2	0,2112	4,9070	0,251

3.2 Modelagem das cargas/prédios

Inicialmente, as cargas/prédios que são atendidas pelo mix de geração da CAMPUSGRID foram caracterizadas em termos das potências ativa e reativa para os cenários de carregamento. O cenário de carregamento leve corresponde ao valor mínimo de consumo, que corresponde ao período da madrugada; o cenário de carregamento pesado corresponde ao valor máximo de consumo (horário de ponta) e o cenário de carregamento médio corresponde ao consumo registrado entre os intervalos de carregamento leve e o pesado, ANEEL (2021a).

No modelo de representação aqui proposto, as cargas, com exceção do GMU, serão representadas em termos de impedância equivalente. Consideram-se impedâncias trifásicas, conectadas em Y (estrela). Esses valores são encontrados a partir dos valores de potência ativa e reativa, obtidos através de medições realizadas nos terminais dos transformadores existentes na área alvo da microrrede e, utilizando-se:

$$Z = \frac{V^2}{S} \quad (5)$$

e

$$R = FP * Z \quad (6)$$

Em que são relacionadas as grandezas potência, tensão e impedância. Para a determinação da indutância equivalente considerou-se (1). Em (5), V é o módulo da tensão entre fases, S é a potência aparente trifásica em *volt-ampère*. Em (6), Z é o módulo da impedância equivalente e FP é o fator de potência. A Tabela 4 apresenta os valores de resistência e indutância que representam as cargas/prédios da CAMPUSGRID para os cenários de carregamento leve, médio e pesado.

Tabela 4. Impedância equivalente das cargas presentes na área da CAMPUSGRID.

Localização	Carga Leve		Carga Média		Carga Pesada	
	R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)
FEF campo/pogo	4,740	2,9	2,183	1,6	0,905	0,6
FEF adm.	1,493	1,3	0,792	0,6	0,493	0,8
BC 01	2,348	2,4	0,691	0,7	0,484	0,4
BC 02	1,696	2,2	0,703	0,9	0,362	0,5
BORA	0,879	1,5	0,469	0,9	0,331	0,6
FEF Biblioteca	4,082	3,4	1,009	1,1	0,752	0,7
FEF Cabine/quadras	5,921	5,2	3,012	2,5	0,906	1,4
Eletroposto	-	-	1,842	0,3	1,84	0,2
Iluminação pública 01	232,544	347,5	4,202	6,3	2,720	4,4
Iluminação pública 02	255,57	319,3	6,689	14,2	2,829	5,9

De forma diferente, o GMU foi representado como um bloco que reúne a carga demandada pelo prédio e a energia gerada pelo Sistema PV existente, da ordem de $336,96 \text{ kW}_p$, ambos conectados ao transformador de 300 kVA (nó 23 da figura 1). Portanto, este bloco pode se comportar como geração (injetando potência na rede) ou como carga (demandando potência da rede).

A Tabela 5 apresenta os valores de potências ativa e reativa para os cenários de carregamento leve, médio e pesado. De forma geral, observa-se que o comportamento predominante do conjunto “carga e geração” do GMU é de geração, ou seja, de injeção de potência na rede. Valores negativos representam que a potência é consumida, enquanto valores positivos significam que a potência é injetada na rede.

Tabela 5. Potência do GMU para os cenários de carregamento leve, médio e pesado.

GMU		S (kVA)	P (kW)	Q (kVAr)
Carga Leve	Máx.	7,299	-3,867	6,190
	Médio	6,406	-1,767	6,158
	Mín.	6,134	0,334	6,125
Carga Médio	Máx.	105,920	105,919	-0,567
	Médio	61,619	61,589	1,915
	Mín.	17,810	17,259	4,396
Carga Pesado	Máx.	219,283	219,054	-10,03
	Médio	131,971	131,933	-3,184
	Mín.	44,961	44,812	3,663

4. MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA CAMPUSGRID NO PSCAD/EMTDC

Uma representação em blocos simplificada da atual rede de distribuição da CAMPUSGRID no PSCAD/EMTDC é mostrada na figura 2.

4.1 Modelagem equivalente do sistema FV

Como parte da representação de rede obtida nesta fase do estudo, optou-se por uma representação simplificada de Sistema FV, sem chaveamento, através de fontes de corrente controladas capazes de sintetizar diferentes perfis de geração, conforme proposto em Barcelos et al. (2020). Na Figura 3 é ilustrado o diagrama de blocos do modelo para um Gerador Intermitente (GI) conectado à CAMPUSGRID, no nó corresponde ao GMU. Trata-se de uma fonte com injeção controlada de corrente, projetada para sintetizar potências reais (pc) e imaginárias (qc) no nó 23 da microrrede. Esta representação é baseada na teoria pq , presente em Akagi et al. (2017), e no referencial síncrono para definição das correntes a serem injetadas na rede elétrica. Este tipo de geração normalmente fornece somente potência ativa (ou seja, potência real) para a rede elétrica, no entanto esse modelo representará o bloco GMU em questão, que é o conjunto da carga e geração FV.

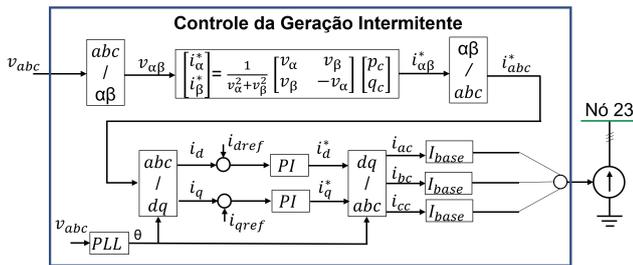


Figura 3. Modelo de Gerador Intermitente (GI) baseado na teoria pq . Fonte: Barcelos et al. (2020).

O modelo aqui considerado pode sintetizar as duas parcelas de potência através da definição das referências para pc e qc , o que possibilita aumentar a gama de cenários de inserção a partir de GI em redes elétricas. Para o caso da representação do sistema de geração fotovoltaica, pode-se considerar como referência pc , um perfil de potência produzido a partir de dados de radiação. De maneira que o modelo equivalente de GI pode possibilitar a representação de diferentes perfis de injeção de potência na microrrede.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

5.1 Carregamento Leve.

Na simulação para o cenário com carregamento leve, foi considerada uma referência de potência ativa de -1,767 kW e de potência reativa igual a 6,158 kVAr para o conjunto que representa o GMU, assim como apresentado na Tabela 5. Na Figura 4 são apresentados os fluxos das potências ativa e reativa nos terminais do GMU.

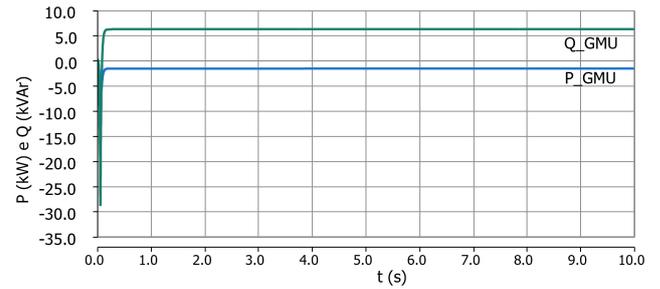


Figura 4. Potências ativa e reativa nos terminais do GMU em carga leve.

As potências requeridas da concessionária para atender essa configuração no PCC, em regime permanente, foram de 138,47 kW e 77,89 kVAr, conforme figura 5.

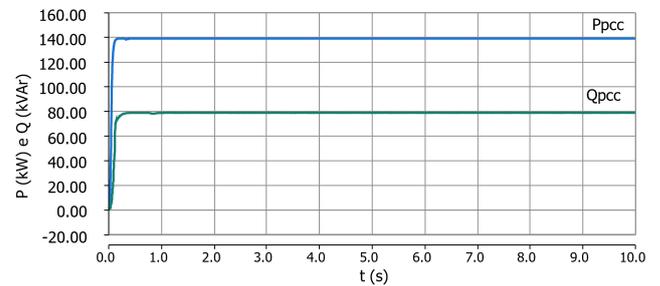


Figura 5. Potências ativa e reativa nos terminais do PCC em carga leve.

Na Figura 6 é apresentado o valor da potência ativa no PCC em relação aos valores de referência de potência ativa no GMU. Observa-se que a rede elétrica da concessionária passa a fornecer mais potência ativa para o GMU à medida que o mesmo demanda mais potência. O valor da potência reativa no GMU foi mantido em um valor constante e igual a 6,158 kVAr.

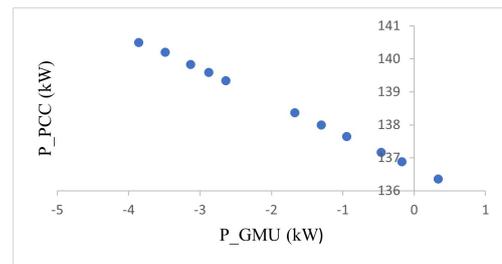


Figura 6. Potência ativa no PCC versus Potência ativa no GMU (carregamento leve).

5.2 Carregamento Médio.

Na simulação para o cenário com carregamento médio, aplicou-se uma referência de potência ativa de 61,589 kW e de potência reativa igual a 1,915 kVAr para o conjunto que representa o GMU. Na Figura 7 é mostrado o fluxo das potências ativa e reativa nos terminais do GMU.

As potências requeridas da concessionária para atender essa configuração no PCC, em regime permanente, foram de 343,9 kW e 182 kVAr, conforme figura 8.

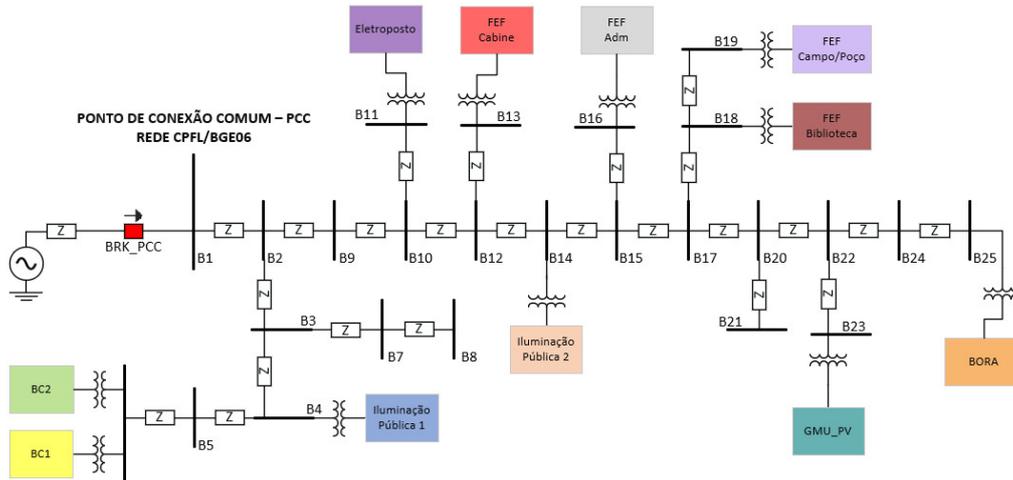


Figura 2. Representação da CAMPUSGRID no PSCAD/EMTDC.

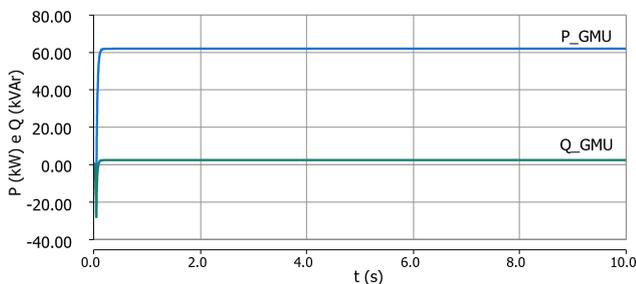


Figura 7. Potências ativa e reativa nos terminais do GMU em carregamento médio.

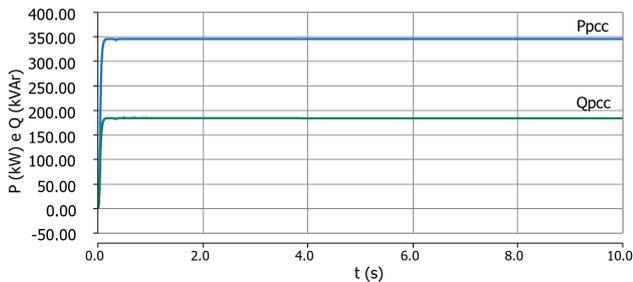


Figura 8. Potências ativa e reativa nos terminais do PCC em carregamento médio.

A potência injetada no GMU foi submetida a variações dentro de seus limites mínimo e máximo como apresentados na Tabela 5. Na Figura 9 são apresentados os valores das potências ativa e reativa no PCC em relação aos valores de referência de potência ativa no GMU.

Observa-se que a potência ativa fornecida no PCC pela concessionária sofre uma redução à medida que o GMU injeta mais potência na microrrede. A variação de potência ativa para o intervalo considerado foi em torno de 88 kW. Enquanto não houve variações significativas para a potência reativa no PCC para o carregamento leve, o mesmo já não pode ser aplicado para o carregamento médio.

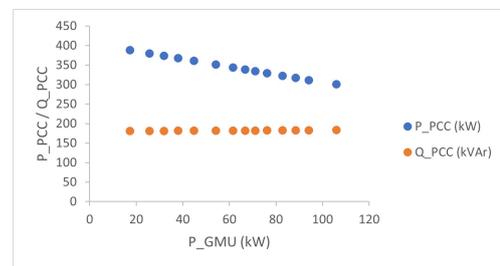


Figura 9. Potências ativa e reativa no PCC versus Potência ativa no GMU (carregamento médio).

Foi simulado um cenário onde inicialmente todas as cargas estão conectadas à rede. Aos 10 s de simulação, o prédio BORA é desconectado e reconectado aos 30 s. Aos 20 s o eletroposto é desconectado e reconectado, sendo reconectado à rede aos 40 s. Na figura 10(a) e (b) é possível observar o comportamento da potência injetada pelo PCC na microrrede e o perfil de tensão nas barras de carga e de referência, respectivamente.

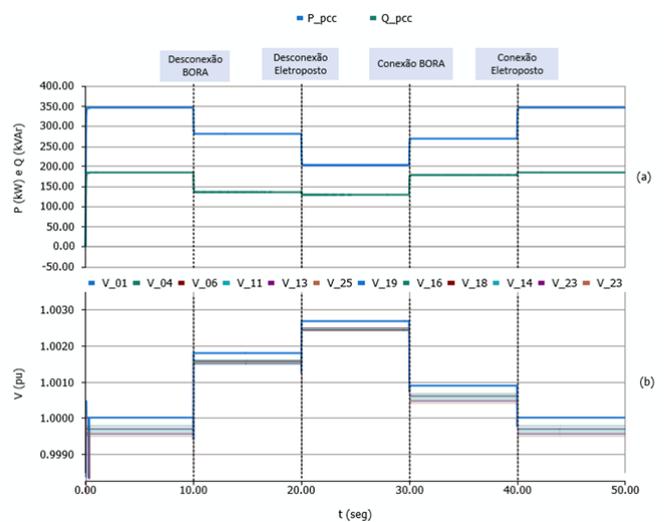


Figura 10. Desconexão e conexão de cargas em carregamento médio.

5.3 Carregamento Pesado.

Aplicou-se uma referência de potência ativa de 131,933 kW e de potência reativa igual a -3,18 kVAr para o conjunto que representa o GMU. Na Figura 11 é mostrado o fluxo das potências ativa e reativa nos terminais do GMU.

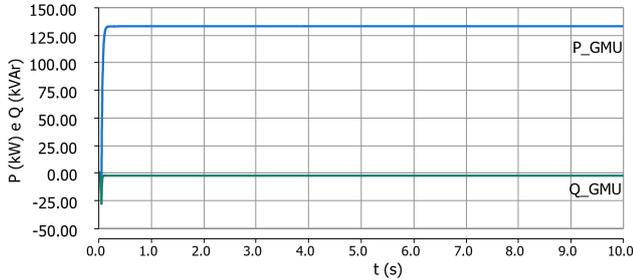


Figura 11. Potências ativa e reativa nos terminais do GMU em carregamento pesado.

As potências requeridas da concessionária para atender essa configuração no PCC, em regime permanente, foram de 476,3 kW e 307,9 kVAr, figura 12.

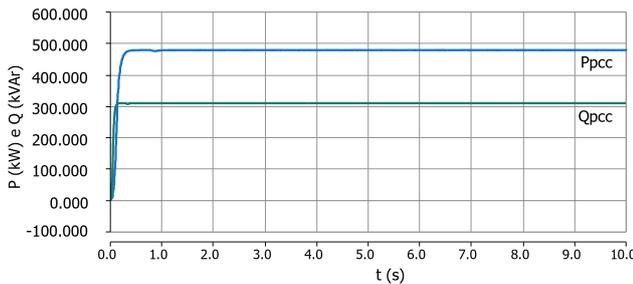


Figura 12. Potências ativa e reativa nos terminais do PCC em carregamento pesado.

Os valores de potência ativa nos terminais do bloco GMU foram submetidos a variações entre os limites mínimo e máximo. Na Figura 13 é apresentado o comportamento das potências ativa e reativa no PCC em relação aos valores de referência de potência no GMU. A variação de potência ativa para o intervalo considerado foi em torno de 175 kW.

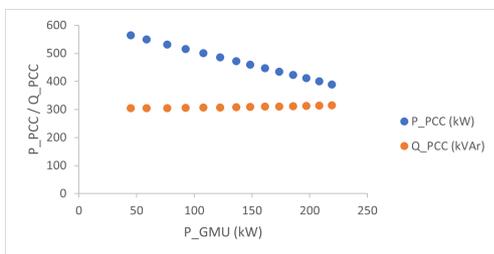


Figura 13. Potências ativa e reativa no PCC *versus* Potência ativa no GMU (carregamento pesado).

Baseado em valores medidos nos terminais do transformador ligado ao GMU, foi modelada uma injeção equivalente variável, para simular a resposta da rede, conforme figura 14(a).

As figuras 14(b) e (c) mostram o fluxo de potência requerido no PCC e a excursão do perfil de tensão nas barras de referência e barras vizinhas ao GMU, respectivamente. É possível observar que quanto maior a injeção de potência no GMU, melhor o perfil de tensão nas barras 20, 22 e 24, vizinhas ao GMU.

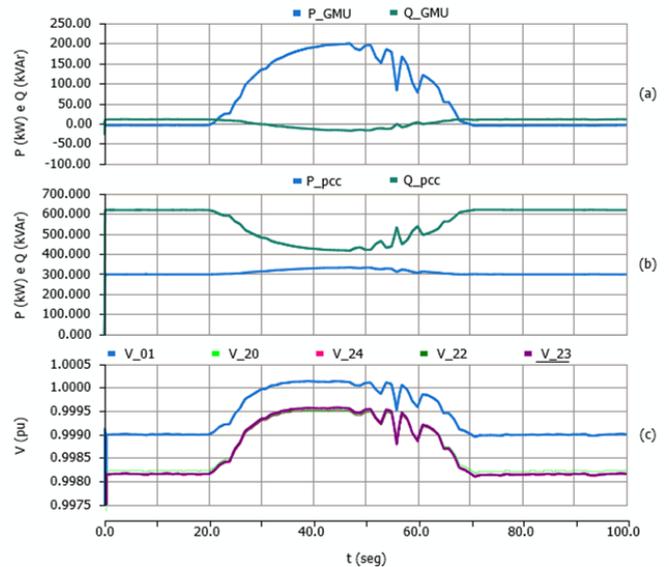


Figura 14. Fluxo dinâmico de potência nos terminais do GMU.

Os perfis de tensão levantados para todos os cenários analisados apresentam valores não inferiores a 0,999 pu.

6. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a modelagem simplificada da microrrede CAMPUSGRID focando em qualidade de energia, especificamente no que tange variações de tensão em regime permanente. Esta modelagem foi realizada com o auxílio de uma ferramenta computacional para simulação de sistemas de potência, o PSCAD/EMTDC. A modelagem da rede de distribuição da CAMPUSGRID permitiu analisar o comportamento desta diante de diferentes cenários de operação, destacando-se os de carregamentos leve, médio e pesado, bem como situações de conexão/desconexão de cargas. Os resultados de simulação mostraram que para os três cenários de operação todos os nós da rede de distribuição da CAMPUSGRID apresentam variações de tensão em regime permanente dentro do especificado pelo PRODIST - módulo 8, ANEEL (2021a). As tensões em todos os nós encontram-se no intervalo de 95% a 105% da tensão nominal de operação da microrrede.

Como extensão deste trabalho, os autores pretendem apresentar a modelagem mais detalhada considerando o BESS, a geração despachável e a ampliação da geração FV. As estratégias de carregamento/descarregamento do BESS, assim como o estudo da rede em modo ilhado sendo o BESS o formador da rede, e as estratégias utilizadas para sincronização da geração despachável à rede serão abordadas em trabalho futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq, FAPEMA e do Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico (ANEEL), por meio do projeto CPFL Merge: Desenvolvimento de Microrredes Eficientes, Confiáveis e Sustentáveis (Código ANEEL PD-00063-0058/2019).

REFERÊNCIAS

- Akagi, H., Watanabe, E.H., and Aredes, M. (2017). “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning”, IEEE Computer Society Press.
- ANEEL (2021a). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST.
- ANEEL (2021b). Resolução normativa ANEEL n° 1.000.
- Bahrami, S. and Mohammadi, A. (2019). “Smart microgrids.”, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02656-1>.
- Barcelos, S.L., de Matos, J.G., and de Souza Ribeiro, L.A. (2020). “Análise de diferentes cenários de integração de geração intermitente na microrrede isolada da Ilha de Lençóis através de modelagem no PSCAD/EMTDC”, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2165>.
- Barcelos, S.L., Gomes de Matos, J., and de Souza Ribeiro, L.A. (2019). “Modelling and analysis of the isolated microgrid installed at the Lençóis Island using PSCAD/EMTDC”, IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/cobep/spec44138.2019.9065711.
- Bellido, M.H., Rosa, L.P., Pereira, A.O., Falcão, D.M., and Ribeiro, S.K. (2018). “Barriers, challenges and opportunities for microgrid implementation: The case of Federal University of Rio de Janeiro”, *Journal of Cleaner Production*, p. 203–216, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.012>.
- CPFL (2017). “GED-2850 -rede compacta - espaçador losangular polimérico”, [online]. URL: <http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/ged-2850.pdf>.
- CPFL (2018). “GED-3667 -projeto de rede de distribuição -cálculo elétrico”, [online]. URL: <http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/ged-3667.pdf>.
- CPFL (2022). “GED-10640 -rede primária condutores nus 15kv e 25kv -estruturas básicas -montagem”, [online]. URL: <http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/ged-10640.pdf>.
- López, J.C., Ota, J.I.Y., Rider, M.J., Pomilio, J.A., da Silva, L.C., and Bento, R.G. (2020). “Objetivos e desafios do projeto de P&D MERGE: Microgrids for Efficient, Reliable and Greener Energy”, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, Santo André, <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2313>.
- NEXANS (2018a). “CA (AAC) Oxlip”, [online]. URL: <https://www.nexans.com.br/pt/products/transmission.and.distribution/ohl.awg/awg/all.alumin476/productid540012140.html>.
- NEXANS (2018b). “Cabo FIPEX BF MT - 8,7 até 15 kv (25x1x5.85)”, [online]. URL: <https://www.nexans.com.br/pt/products/transmission.and.distribution/insulated.copper.cablesformediumvoltage/cabosfipex.bf.mt/cablesfip27824.html>.
- NEXANS (2018c). “FIPEX TR 1x185mm2 15kV”, [online]. URL: <https://www.nexans.com.br/pt/products/transmission.and.distribution/insulated.copper.cablesformediumvoltage/cabosfipex.bf.mt/cablesfip27824.html>.
- NEXANS (2018d). “FIPEX TR 1x70mm2 15kV”, [online]. URL: <https://www.nexans.com.br/pt/products/transmission.and.distribution/insulated.covered.aluminum.cables.for.medium.voltage/cablesfipex.tr/xlpe.cover75275/productid617166.html>.
- PSCAD (2021). “Knowledge base”, [online]. url: <https://www.pscad.com/knowledge-base/topic-129/v->.
- Quadros, R., Jucá, J.L., Cypriano, J.G.I., Barbosa da Silva, R.P., Pereira da Silva, L.C., and Bento, R.G. (2021). “Implementation of microgrid on the university campus of UNICAMP-Brazil: Case study”, *Journal of Electronics and Advanced Electrical Engineering*.
- Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W.H., Guerrero, J.M., and Vasquez, J.C. (2014). “Microgrids: Experiences, barriers and success factors”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, p. 659–672.
- Souza, A.C.Z.d. and Castilla, M. (2019). “Microgrids design and implementation”, Springer.
- Souza, C.A.S. (2022). “Relatório das correntes de curto circuito para subsidiar projeto MICRORREDES”, UNICAMP - Diretoria Executiva de Administração - DEA, Campinas.
- UNICAMP (2019). “Campus Sustentável”, UNICAMP, [online]. url: <https://www.campus-sustentavel.unicamp.br/>.