

IMPACTOS OPERACIONAIS DA COMPLEMENTARIEDADE DE FONTES DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E A BIOGÁS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Rodrigo M. de Azevedo
Wagner S. Brignol
Luciane N. Canha
Dalvir Maguerrosky

*Centro de Excelência em Energia e Sistema de Potência (IFSUL)
e Eletrosul*

RESUMO

Com as alterações da Resolução Normativa (REN) 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regra o sistema de conexão e compensação de energia elétrica das micro e miniGD, por meio da REN 687/2015 que entrou em vigor em março de 2016, instiga, cada vez mais, a complementariedade de fontes de geração distribuída com a integração de recursos disponíveis. Este trabalho tem por objetivo, o desenvolvimento de perfis de geração de um sistema solar fotovoltaico, na modelagem de uma curva genérica de geração horária ao longo de um dia. Ainda, será realizada a complementariedade por meio da sobreposição de curvas na integração de sistemas fotovoltaicos com sistemas de geração a partir de biogás de dejetos suínos. Ao realizar a integração desses recursos de geração serão analisados os comportamentos operacionais (carregamento de potência ativa e reativa, carregamento de condutores e perdas elétricas) causados a rede de distribuição devido à inserção dessas fontes de GD de forma conjunta.

Palavras-chave: Micro e Migeração Distribuída, Perfil de Geração e Integração de Fontes de Geração.

ABSTRACT

Considering the amended Normative Resolution No. 482/2012 (REN 482/2012) of the Brazilian National Agency of Electric Energy (ANEEL), which regulates the connection and the compensation of power systems in micro and mini DG through the REN 687/2015 expected for March 2016, it can be observed an incentive to the complementarity between the sources of DG and the integration of available resources. The aim of this study is to develop generation profiles of a photovoltaic solar system, producing a generic curve of hourly generation over a day. Moreover, the com-

plementarity will be carried out by overlapping the curves to integrate the ones from the photovoltaic systems with those from the biogas manure generation systems. The operational impact on the distribution network due to the insertion of these DG sources will be analysed. The aspects considered are active and reactive power loading, conductors loading and electrical losses.

Keywords: Micro and Mini Distributed Generation, Generation Profile, Integration of Generation Sources.

1. INTRODUÇÃO

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em um marco regulatório inovador, publicou as condições gerais para o acesso de microgeração (microGD) e minigeração distribuídas (miniGD) nos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, *net metering*, por meio da REN 482/2012 (ANEEL, 2016).

Em 2016, as micro e miniGD's no Brasil superaram a marca de 1.500 sistemas conectados à rede de distribuição, sendo estas de diversos tipos, tais como: eólicas, fotovoltaicas e biogás (ANEEL, 2016).

Como o Brasil possui diversos potenciais energéticos possíveis de serem utilizados, há uma expectativa que um ponto de conexão possa ser composto por um ou mais tipos de fontes de micro e/ou miniGD, causando assim uma complementariedade de fontes.

Uma vez que, as redes de distribuição de energia elétrica, originalmente, não foram projetadas para inserção de unidades geradoras, faz-se necessário que as distribuidoras possam analisar os impactos que estas fontes podem causar durante a operação de sistemas de distribuição, tais como: níveis de tensão, carregamento de condutores, perdas elétricas, entre outros.

Sendo assim, este trabalho apresenta uma avaliação dos impactos operacionais em uma rede de distribuição, causados pela complementariedade de duas miniGD's (fotovoltaica e à biogás de dejetos de suínos), considerando suas características de geração de energia elétrica, as quais dependem das condições e meios nas quais elas estão.

Os resultados apresentados fazem parte do projeto de P&D-ANEEL 014/2012, denominado P014/2012, firmado entre ELETROSUL, UFSM, CERTI, UFSC, ITAI, FPTI e EMBRAPA.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação dos impactos operacionais que as micro e miniGD podem ocasionar numa rede de distribuição, tais como potência ativa e reativa

demandada, perfil de tensão, perdas de energia, carregamento dos cabos condutores e fator de potência da rede; é necessário conhecer tanto as curvas de carregamento da rede, quanto as curvas de geração de cada fonte.

Por se tratar da complementariedade de duas fontes de geração de energia elétrica, neste caso biogás e solar, faz-se necessário determinar o potencial disponível por cada tipo de fonte e o seu perfil de geração de energia elétrica.

Portanto, a Figura 1 apresenta os passos necessários para avaliação dos impactos causados pela complementariedade das duas miniGD's numa rede de distribuição.



Figura 1 – Fluxograma da metodologia desenvolvida

2.1 Determinação do potencial de geração de biogás oriundos de dejetos suínos

Para determinar o perfil de geração de uma miniGD à biogás de dejetos suínos é necessário estimar a produção de biogás disponível, uma vez que, o seu regime operacional é determinado pela produção diária de biogás.

A equação (1) expressa a taxa de produção de metano (m^3 de CH_4/m^3 da câmara de digestão/dia) (CHEN; HASHIMOTO, 1978):

$$\gamma_v = \frac{B_o \cdot S_o}{TRH} \left(1 - \frac{K}{TRH \cdot \mu_m - 1 + K} \right) \quad (1)$$

Onde:

Bo - Taxa máxima de produção de metano (m^3 de CH_4/kg de SV);

So - Concentração de SV do efluente (kg/m^3);

TRH - Tempo de retenção hidráulica (dias)

μ_m - Taxa de crescimento máximo específico (dia^{-1});

K - Coeficiente cinético (adimensional)

A potência de geração de energia elétrica a partir do biogás pode ser determinada a partir da (2), adaptada de COSTA (2006).

$$PE = \frac{\gamma_v \cdot PCI \cdot \eta_{mp} \cdot 4,1868}{3600 \cdot t_{op.}} \quad (2)$$

Onde:

PE - Potência de geração de energia elétrica (kW);

PCI - Poder calorífico do biogás ($kcal/m^3CH_4$);

η_{mp} - Rendimento máquina primária Ciclo Otto;

$t_{op.}$ - Tempo de operação (horas/dia);

4,1868 - Fator de conversão de $kcal/kJ$, onde $1kJ/s = 1MW$

A Figura 2 mostra que a produção de energia elétrica pode ser considerada constante ao longo de um dia, devido à característica linear da produção de biogás.

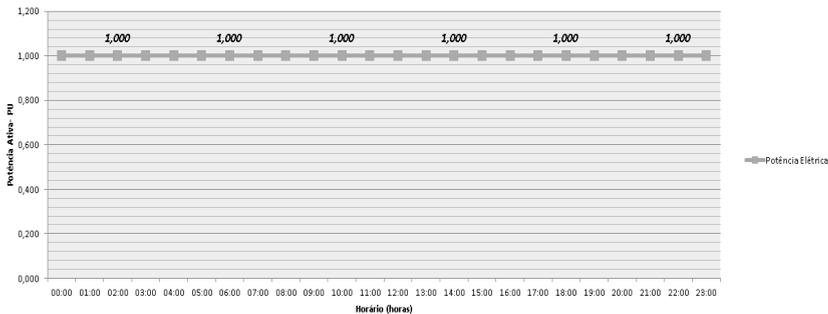


Figura 2 – Curva diária de produção de energia elétrica a partir do biogás

2.2 Determinação do potencial de geração de energia fotovoltaica

A energia gerada pelo sistema fotovoltaico é dimensionada em

relação à potência nominal do gerador fotovoltaico, do rendimento do inversor CC/CA a ser utilizado e do número de horas de Sol Pleno. Em (3) é expresso o cálculo da geração de energia elétrica.

$$E_g = P_T \cdot SP \cdot \eta_{CC/CA} \quad (3)$$

Onde:

E_g – Energia gerada pelo sistema fotovoltaico expressa em kWh_P (kilowatt – hora – pico);

P_T – Potência Nominal do Sistema Fotovoltaico expressa em kW_P;

SP – Número de horas de Sol Pleno expresso em horas;

$\eta_{CC/CA}$ – Rendimento do inversor de corrente contínua para corrente alternada (%).

Para determinar o valor acumulado de energia solar, o número de horas de Sol Pleno, SP , é a grandeza que espelha o número de horas na qual a irradiância solar deva permanecer constante e igual a 1 kW/m², de maneira que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo sol no local em questão, acumulada ao longo de um dia (CRESESB, 2016).

A partir de (4) pode-se calcular o número de horas de Sol Pleno.

$$SP = \frac{\overline{H_T} (kWh/m^2)}{1000 (W/m^2)} \quad (4)$$

Sendo $\overline{H_T}$ a radiação solar global incidente no plano inclinado, em média diária (kWh/m²/dia) ou mensal (kWh/m²/mês).

2.2.1 Curva horária de geração energia elétrica do sistema solar fotovoltaico

A estimativa de produção de energia solar fotovoltaica é realizada por meio dos atlas solarimétricos que expõem a média de irradiância solar, até mesmo no plano inclinado da latitude da localidade, em determinadas regiões. Porém, essa estimativa de geração é a projeção acumulado ao longo de um dia, mês ou ano.

Para realizar estudos de impactos causados por fontes de micro e/ou miniGD fotovoltaicas em redes de distribuição, é necessária determinar uma curva horária de produção de energia elétrica.

Por tanto, faz-se necessário determinar uma curva horária ge-

ração de energia elétrica de uma GD fotovoltaica, de forma que esta possa ser aplicada para qualquer GD fotovoltaica, mesmo que haja variação do tipo de tecnologia utilizada e região de instalação.

Sendo assim, para o desenvolvimento desta curva genérica, levantou-se uma curva de geração de uma microGD já instalada, por meio de medições realizadas durante 2013, 2014 e 2015. Esta microGD está localizada no município de Pelotas/RS e possui as seguintes características: 04 painéis fotovoltaicos de 245kWp, da marca *Yingli Solar* (ligadas em série = 1kWp); inversor marca *Sunny Boy*. A Figura 3 apresenta a curva de produção diária deste sistema de geração fotovoltaico.

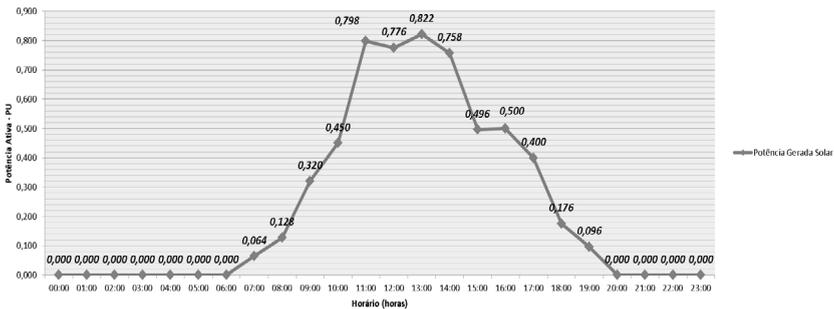


Figura 3 – Curva diária de referência para produção de sistemas fotovoltaicos

A partir desta curva referência, desenvolveu-se um fator de correção a ser aplicado nesta, de forma a obter-se uma curva de geração para qualquer micro e/ou miniGD fotovoltaica, independente da tecnologia utilizada e região de instalação.

2.2.2 Aplicação do Fator de Correção (FC)

Para determinar o FC deve-se considerar uma correlação entre as potências produzidas em cada hora da curva de referência, com as potências a serem produzidas em cada hora na localidade na qual se deseja projetar um sistema fotovoltaico. Para tanto, deve-se utilizar a estimativa de geração diária (3) na região em que se deseja instalar a micro e/ou miniGD e a estimativa de geração diária (3) da região de referência, conforme apresentado em (5).

$$FC = \frac{Eg_{LOCAL} (kWh/m^2/dia)}{Eg_{REFERÊNCIA} (kWh/m^2/dia)} \quad (5)$$

Onde,

FC – Fator de correção;

$E_{g_{LOCAL}}$ – Estimativa de geração diária de acordo com valores diários de irradiação solar no plano inclinado, na latitude da região de aplicação do sistema solar a ser instalado;

$E_{g_{REFERÊNCIA}}$ – Estimativa de geração diária calculada por (3) com base em valores diários de irradiação solar no plano inclinado na latitude da região de referência.

Para que (5) possa ser utilizada por outra tecnologia ou outra região, é necessário que se leve em consideração os rendimentos dos equipamentos a serem empregados na nova micro e/ou miniGD de referência e projetada. Como o sistema utilizado para referência possui rendimento do inversor de 98,1% e a irradiação média diária no plano inclinado na latitude da região de referência, Pelotas, é 5,4kW/m², conforme SWERA (2006), temos (6):

$$FC = \frac{\overline{H_{T_{LOCAL}}} \cdot \eta_{CC/CA_{LOCAL}}}{5,30} \quad (6)$$

Portanto, para determinar a curva de geração da nova micro e/ou miniGD fotovoltaica, deve-se multiplicar o FC pelos valores da curva de geração de referência, de acordo com (7).

$$P_{GH} = P_{CRF} \cdot FC \quad (7)$$

Onde:

P_{GH} – Potência gerada na hora com referência na potência nominal do sistema fotovoltaico projetado expresso em pu;

P_{CRF} – Potência da hora da curva de referência - pu;

FC – Fator de correção.

3. DESENVOLVIMENTO PRÁTICO

O projeto P014/2012, consiste na instalação de uma miniGD à biogás de dejetos suínos, denominada de Mini Central Térmica (MCT), porém o projeto prevê a complementação na geração de energia elétrica por meio do uso de sistemas de geração fotovoltaicos a serem instalados nos telhados dos criadouros.

A conexão dos dois sistemas ocorrerá em um alimentador de-

nominado INA05 da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), localizada na cidade de Itapiranga – SC, conforme Figura 4.

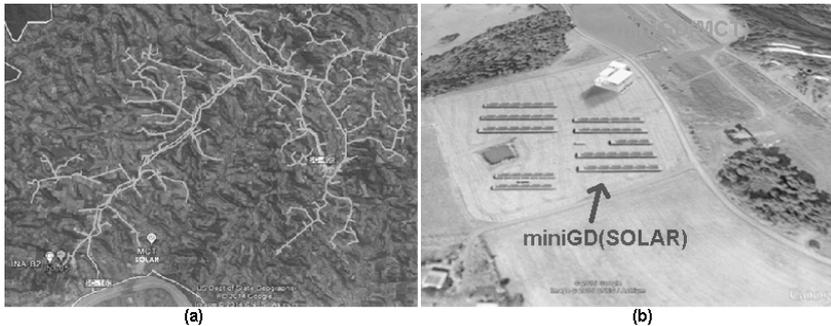


Figura 4 – Rede de Distribuição e Ponto de conexão das miniGD'S, AL INA05 (a), Localização MCT e Central Solar Fotovoltaica (b)

Para a análise dos impactos decorrentes da conexão das miniGD's no INA05 é necessário determinar as curvas horárias de geração de energia elétrica; para tanto deve-se determinar as características técnicas das miniGD's. Tais características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Técnicas das miniGD's à Biogás e Fotovoltaica

| Características Técnicas | | | | | |
|----------------------------|-----------|---------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| Rede de Distribuição INA05 | | MINIGD (MCT) | | MINIGD Fotovoltaica | |
| Tensão Nominal | 23kV | Produção de Biogás | 2.451,67 m ³ /dia | Irradiação Local | 6kW/m ² |
| Cabos Condutores Tronco | 1/0AWG CA | Potência Nominal | 258kW | Potência Nominal | 300kWp |
| Corrente Nominal | 184A | Potência Despachada | 172kW | Rendimento Inversor | 98,10% |
| | | Regime Operacional | 54h | FC | 1,11 |

As placas fotovoltaicas utilizadas para desenvolver o estudo são da marca *Yingli Solar*, série YGE 60 – YL245P-29b. O sistema de inversores é da marca *SMA Sunny Tripower* e a irradiação no plano inclinado considerada 6,0kW/m² em Itapiranga no mês de janeiro (SWERA, 2006).

3.1 Determinação das Curvas Horárias de Geração de Energia Elétrica das miniGD's

De acordo com os dados da Tabela 1, foram determinadas as curvas horárias de geração (regime operacional) das miniGD's à biogás e Fotovoltaica, tendo como resultado as curvas apresentadas na Figura 4.

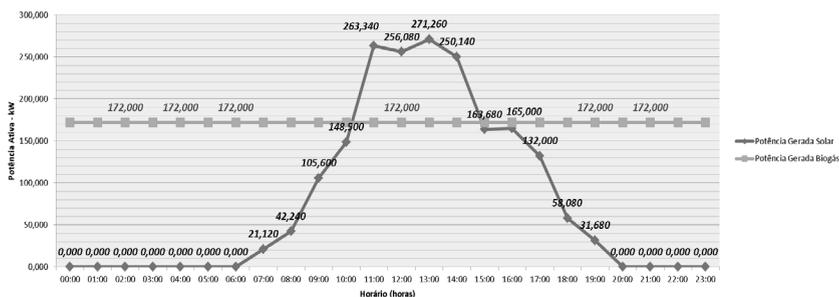


Figura 4 – Regime Operacional das GD'S Solar e a Biogás

3.2 Avaliação dos Impactos da Conexão da miniGD à biogás e miniGD Fotovoltaica no INA05

Para a avaliação dos possíveis impactos a serem causados pela complementariedade das miniGD's na rede de distribuição INA05, foram analisados quatro cenários que são:

- I. O estudo técnico operativo do carregamento da rede de distribuição em um dia típico sem a conexão das miniGD's (Cenário 1);
- II. Os impactos causados pela conexão da miniGD à biogás (Cenário 2);
- III. Os impactos causados pela conexão da miniGD fotovoltaica (Cenário 3);
- IV. Os impactos causados pela conexão simultânea das duas miniGD's – complementariedade das fontes - (Cenário 4).

Para realizar as simulações das condições operacionais do INA05 e possíveis impactos dos quatro cenários, utilizou-se o software PSL®DMS que é uma ferramenta de suporte ao planejamento e à operação de sistemas de distribuição.

Sendo assim, nestes cenários foram avaliados: Carregamento de Potência Ativa, Carregamento dos Cabos Tronco e Perdas de Potência Ativa da Rede.

A) Condições de Carregamento de Potência Ativa na Rede

A curva de potência ativa do INA05, sem a conexão das miniGD's, apresenta que a carga leve ocorre às 2 horas, DkW = 1.020,56kW e a carga pesada ocorre às 18 horas, DkW = 3.690,78kW. A Figura 5 apresenta as condições de carregamento de potência ativa do INA05, de acordo com os quatro cenários.

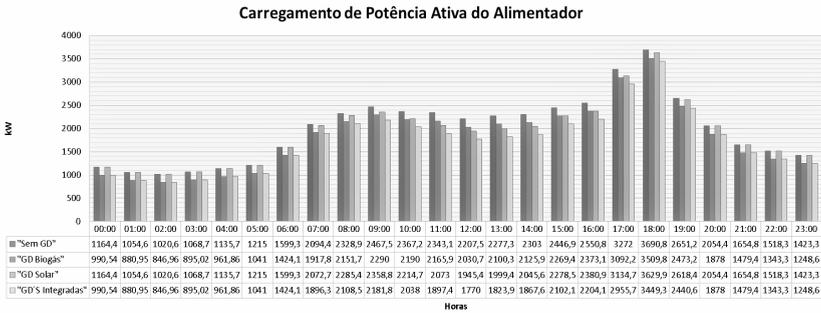


Figura 5 – Potência Ativa do INA05

B) Condições de Carregamento dos Cabos Condutores Tronco da Rede

Às 18 horas o INA5 apresenta o carregamento máximo dos cabos condutores tronco (I=103,885A) o que corresponde aproximadamente a 56,5% da corrente nominal, Cenário 1. A Figura 6 os resultados das simulações dos quatro cenários.

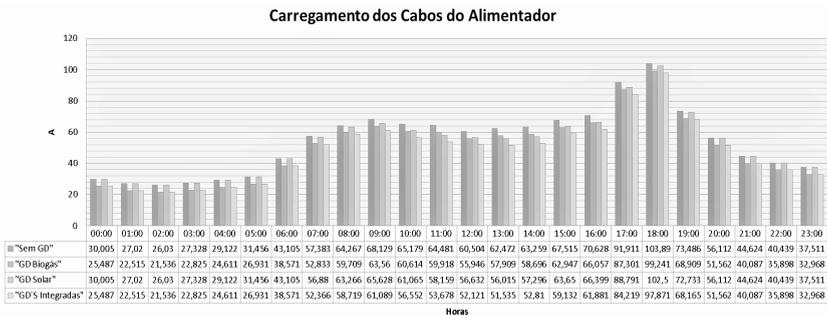


Figura 6 – Carregamento dos Cabos Condutores Tronco do INA05

C) Condições de Perdas de Potência Ativa da Rede

As perdas acumuladas de potência ativa do INA5, sem a conec-

xão da GD, às 18 horas atingiu valor máximo de 346,69 kW, ou seja, 9,39% de perdas. O valor mínimo ocorreu às 2 horas com 21,97 kW, representando 2,14% de perdas. A Figura 7 apresenta as perdas acumuladas de potência ativa do INA05, de acordo com os quatro cenários.

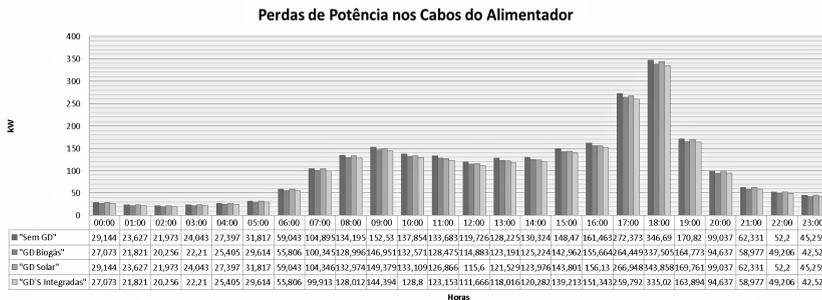


Figura 7 – Perdas Acumuladas de potência Ativa do INA5

De acordo com as análises realizadas, todas as características operacionais da rede obtiveram impactos positivos, quando comparadas às condições do INA05 sem conexão de nenhuma miniGD. Porém, a complementariedade das fontes à biogás e fotovoltaica ocasionou os melhores índices. A Tabela 2 sintetiza, em níveis percentuais, os impactos positivos nas características operacionais do INA05 obtidos nos Cenários 2, 3 e 4, comparados ao caso base (Cenário 1).

Tabela 2 - Comparativo dos Impactos no INA05 devido a conexão das miniGD à biogás e fotovoltaica

| | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 | Cenário 4 |
|--|------------------|----------------|----------------|----------------|
| Maior Carregamento do INA5 - Potência Ativa -18 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 4,90% | Redução 1,65% | Redução 6,54% |
| Menor Carregamento do INA5 - Potência Ativa -2 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 17,00% | Sem Alteração | Redução 17,00% |
| Carregamento do INA5 - Potência Ativa -13 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 4,85% | Redução 12,35% | Redução 17,52% |

| | | | | |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Corrente do INA5 -18 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 4,50% | Redução 1,33% | Redução 5,80% |
| Corrente do INA5 -2 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 17,26% | Sem Alteração | Redução 17,26% |
| Corrente do INA5 -13 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 7,30% | Redução 10,34% | Redução 17,51% |
| Perdas INA5 -18 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 2,65% | Redução 0,81% | Redução 3,40% |
| Perdas INA5 -2 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 7,81% | Sem Alteração | Redução 7,81% |
| Perdas INA5 -13 Horas- | Caso Base Sem GD | Redução 3,93% | Redução 5,22% | Redução 7,96% |

4. CONCLUSÕES

No estudo de caso analisado, ficou evidente que no horário de carga pesada da rede a miniGD fotovoltaica contribuiu pouco, devido à baixa irradiação neste horário, porém, ela auxilia na melhora das características operacionais da rede nos horários de seu despacho. Por parte da miniGD a biogás, observou-se que a sua produção foi contínua e auxiliou à melhora das condições operacionais da rede durante todo dia.

Por possuírem características de operação diferentes, observou-se que a complementariedade das fontes ocasionou os melhores resultados nas características operacionais da rede.

Por tanto, os resultados obtidos neste trabalho comprovam que a análise da complementariedade de fontes de micro e/ou miniGD's, sob os aspectos operacionais das redes, serão necessários, pois as conexões simultâneas de duas ou mais fontes num mesmo ponto, podem resultar em impactos mais significativos numa rede de distribuição, sejam eles positivos ou negativos. Neste sentido, as criações das curvas horárias de geração das fontes são de grande importância, pois estas podem auxiliar as distribuidoras de energia elétrica a avaliar melhor os impactos positivos e negativos que a complementação pode trazer ao sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, P&D Eletrosul Chamada Pública ANEEL P014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acessado em março de 2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Nota Técnica nº 0017/2015-SRD. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/026/documento/nota_tecnica_0017_2015_srd.pdf. Acessado em fevereiro de 2016.

CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. Kinetics of Methane Fermentation. In: Proceedings of Symposium on Biotechnology in Energy Production and Conservation, 1978.

COSTA, D. F. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006. 194 p. Dissertação de Mestrado em Energia. Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CRESESB, MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, RIO DE JANEIRO, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acessado em março 2016.

SWERA, 2006. Atlas Brasileiro de energia Solar; 1ª Edição. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acessado em abril de 2016.

