
MODELO DE MICROGERAÇÃO HÍDRICA ACOPLADA AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
HIDRIC MICROGENERATION MODEL COUPLED TO THE WATER DISTRIBUTION SYSTEM

SANTOS, Diego Fernandes dos¹; MACEDO, Robson Mota¹;

¹Graduando do Curso de Engenharia Elétrica – Universidade São Francisco

diegofs04@gmail.com / robson.macedo82@gmail.com

RESUMO. O artigo apresenta um modelo de microgeração hídrica no sistema de distribuição de água, como um meio de contribuir na geração de energia a partir de fontes renováveis, sustentáveis e alternativas. O modelo é baseado em uma turbina helicoidal de Gorlov (GHT), um dos meios mais viáveis para a microgeração renovável, pois independe das condições climáticas. Para seu funcionamento, necessita-se de um fluxo de água, o qual pode ser obtido nas tubulações das concessionárias de tratamento e distribuição de água, rios e outros locais, para gerar potência mecânica em um gerador elétrico. Neste trabalho, realizou-se a modelagem da GHT e a simulação do funcionamento da mesma acoplada ao sistema de distribuição de água da cidade de Campinas–SP. Os resultados obtidos indicam que houve uma contribuição para aliviar a demanda na baixa tensão (BT), sem afetar as grandezas elétricas da rede, bem como pela análise hipotética de geração anual e uma economia de energia.

Palavras-chave: microgeração hídrica, turbina helicoidal de Gorlov, energia renovável.

ABSTRACT. The article presents a model of water microgeneration in the water distribution system as a means to contribute to the generation of energy from renewable, sustainable and alternative sources. The model is based on a Gorlov helical turbine (GHT), one of the most viable means for renewable micro-generation since it is independent of the climatic conditions. For its operation, a flow of water is needed, which can be obtained in the pipelines of water treatment and distribution utilities, rivers and other places, to generate mechanical power in an electric generator. In this work, the modeling of the GHT and the simulation of the operation of the same coupled to the water distribution system of the city of Campinas-SP was carried out. The results indicate that there was a contribution to alleviate the demand in the low voltage (BT), without affecting the electrical magnitudes of the network, as well as the hypothetical analysis of annual generation and an energy saving.

Keywords: hydrogeneration, turbine of Gorlov, renewable energy.

INTRODUÇÃO

O impacto ambiental é uma parcela da atual crise mundial nos tempos atuais, sobretudo, o aquecimento global e a limitação da quantidade de água existente. Há buscas de meios para tentar sanar ou reduzir esses problemas existentes: Gorlov apresenta um modelo de turbina hidrocínética a ser implantada em rios, onde conservam a segurança dos peixes (GORLOV, 2010). Viana apresenta as turbinas hidrocínéticas como alternativas na geração de energia elétrica (VIANA, 2005).

Atualmente, não há como imaginar a vida humana sem a energia elétrica, pois a eletricidade é essencial no cotidiano do homem. É notório que, para gerar energia elétrica, algumas fontes são necessárias, por exemplo, a água. As hidrelétricas utilizam a água para gerar energia elétrica, porém, para construir uma hidrelétrica há impactos ambientais e sociais.

Os meios de geração de energia renovável estão sendo explorados gradativamente, pois contribuem para um mundo sustentável, utilizando fontes naturais – água, sol e vento – para geração de energia, com a finalidade de não degradar o meio ambiente.

Breve histórico do uso da água e da energia elétrica

A água é um recurso natural imprescindível para os seres vivos. Os humanos não só se apropriaram do consumo, mas também a utilizaram em atividades como: irrigação, higienização, produção de alimentos e aplicações em desenvolvimento de fontes de energia.

Os povos da antiguidade apropriaram-se da água para irrigar suas plantações e abastecer suas casas por meio de sistemas de canalização. No século IV a.C, Roma apresentou resultados incomparáveis para época, como: instalação de banhos públicos e termas que consumiam uma média de 750 milhões de litros de água por dia, através de uma infraestrutura canalizada e distribuída em uma extensão de 400 (km). Os romanos, também, desenvolveram dispositivos especiais de medição de consumo de água, como por exemplo: a criação do hidrômetro (JURISWAY, 2009).

Com a evolução da humanidade, essa engenhosidade começou a ganhar uma nova direção. Na revolução industrial, houve a expansão da roda hidráulica, com a função de moer grãos e acionar máquinas têxteis (FOX, 2011).

A partir do advento da energia elétrica para consumo, a água se tornou a fonte de energia primária para geração da eletricidade. A adoção da corrente alternada, de Nikola Tesla, e a aplicação das teorias do eletromagnetismo e da energia cinética, tornou-se possível a construção das hidrelétricas, cuja capacidade de gerar energia elétrica em grande escala, através do fluxo de água em rios, é ainda amplamente utilizada nos dias atuais.

Por conseguinte, com a introdução da corrente alternada, na década de 1880, cerca de 40% dos recursos de potências hidrelétricas nos Estados Unidos foi desenvolvida e conectada à rede de distribuição. Atualmente, a potência hidrelétrica e composta por aproximadamente 16% de energia elétrica produzida no território americano (FOX, 2011).

A Energia Elétrica no Brasil

A grande dependência da geração de energia a partir das hidrelétricas é motivo de preocupação, principalmente após o apagão energético de 2001 e a seca que afetou a região sudeste nos anos de 2014 e 2015. Estes eventos, fizeram com que as hidrelétricas não conseguissem produzir energia suficiente para suprir a demanda, sendo necessário compensar com usinas termoelétricas, onde a queima de combustível impacta negativamente o meio ambiente, e aumenta o custo de geração de energia elétrica.

Em contrapartida, há um considerável empenho mundial no desenvolvimento de geração de energia limpa, tendo um grande destaque as gerações através das placas fotovoltaicas e turbinas eólicas. Em 2015, a Alemanha teve cerca de 33% da eletricidade consumida no país provinda de energia renovável, com queda na tarifa de 10%. A meta é tornar o país 100% renovável até 2050 (LEAL, 2016).

Estima-se que a energia hidráulica continue sendo a mais importante na matriz elétrica brasileira de 2017, respondendo por 67,9%, o qual em 2016 foi (68,6%). Porém, essa diferença será compensada pelo crescimento de outras fontes renováveis, como a eólica e a biomassa. Nesse sentido, a eólica deverá passar de uma proporção de 5,3% para 6,5%, e a biomassa de 8,8% para 9,0%, de 2016 para 2017 (MME, 2017).

Faz-se necessário a compreensão dos termos microgeração e minigeração. A resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) N° 687 de 2015, considera microgeração até 75 (kW) e minigeração superior a 75 (kW) e menor ou igual a 3 (MW) para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 (MW) para cogeração qualificada. A microgeração pode ser acoplada diretamente na rede de baixa tensão (ANELL, 2015).

Há uma quantidade de recursos naturais abundante a ser explorada e utilizada não só por energia solar e eólica, mas também da água ofertada, a qual nesse caso é concentrada às hidrelétricas, conforme aponta a Figura 1. O presente trabalho objetiva justamente contribuir neste aspecto, apresentando uma forma alternativa de aproveitamento da energia potencial da água para produção de energia elétrica.

Fontes de energias renonáveis
No Brasil, hidrelétricas ainda são a principal fonte de energia
Em megawatts (2015)

Hidrelétricas	86.842
Biomassa	13.257
Eólica	8.715
Pequenas Centrais Hidrelétricas	5.220
Biocombustíveis	87
Biogás	78
Solar	21

Figura 1 – Geração de energia elétrica no Brasil em 2015. (CALIXTO, 2016).

Distribuição de água no município de Campinas

A aplicação de aproveitamento da energia hídrica apresentada neste trabalho foi modelada para ser conectada à rede de distribuição de água. A delimitação geográfica deste estudo é a cidade de Campinas-SP, onde o tratamento e distribuição de água são realizados pela Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A (SANASA).

Há cinco Estações de Tratamento de Água (ETA) espalhadas geograficamente no município. As ETA 1 e 2 e ETA 3 e 4 captam água do Rio Atibaia. Já a ETA Capivari, capta água do Rio Capivari. Todas essas captações são realizadas por bombeamentos. Nessas ETAs a água é tratada e a distribuição é por gravidade aos reservatórios espalhados pela cidade. Na Tabela 1 é possível compreender o funcionamento do sistema da SANASA, bem como notar que a ETA 3 e 4 tem mais capacidade em relação às outras. Por isso, para fins de estudos, nesse trabalho a ETA 4 foi a escolhida.

Tabela 1 – Sistema de tratamento e distribuição de água. (SANASA, 2011).

Estação	Manancial	Processo de Tratamento	Capacidade (l/s)		Início
			Nominal	Operação	
ETA 1	Rio Atibaia	Convencional	450	450	1936
ETA 2	Rio Atibaia	Convencional	650	650	1961
ETA 3	Rio Atibaia	Convencional	1600	1600	1972
ETA 4	Rio Atibaia	Convencional	2400	2100	1991
Capivari	Rio Capivari	Convencional	360	380	1988
Poço Village Campinas	Aquifero Itararé	Cloração	4,4	1,20	2007
Poço Monte Belo	-	Cloração	-	0,64	2004
Poço Monte Belo	-	Cloração	-	0,54	2004

A Tabela 2 apresenta dados relativos à produção de água distribuída no ano de 2011.

Tabela 2 – Produção de água em 2011. (SANASA, 2011).

Produção de Água Distribuída por Unidade – 2011

Unidade	Volume Aduzido (m ³ /ano)	Volume Perdido (m ³ /ano)	Volume Tratado (m ³ /ano)	Perdas (%)	% Tratada por Unidade
ETA 1	11.760.858	1.027.197	10.733.661	8,73	10,24
ETA 2	9.878.235	917.248	8.960.987	9,29	8,55
ETA 3 e 4	82.762.410	4.345.146	78.417.264	5,25	74,79
ETA Capivari	6.956.889	350.711	6.606.178	5,04	6,3
Poços	130.921	-	130.921	-	0,12
Total	111.489.313	6.640.302	104.849.011	5,96	-
Média Mensal	9.290.776	555.346	8.735.430	-	-

O escoamento da água é conhecido basicamente como interno e externo: O escoamento interno é limitado por superfície sólida, que são os laminares ou turbulentos, como por exemplo, realizados em tubos, dutos, bocais, difusores, contrações e expansões súbitas, válvulas e acessórios; Escoamento externo é o escoamento sobre corpos imersos em fluídos sem fronteiras, como por exemplo, aerofólios, automóveis e aviões (FOX, 2011).

Assim, o escoamento da SANASA se classifica como interno, pois sua distribuição é feita por adutoras.

Turbinas hidrocínéticas

As turbinas hidráulicas são projetadas para transformar energia mecânica em energia elétrica, onde o fluxo da água em uma turbina resulta em energia elétrica.

Há alguns tipos de turbinas tipicamente mais conhecidas que são implantadas normalmente em usinas hidrelétricas: Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo.

Além das turbinas convencionais, há as turbinas hidrocínéticas, as quais são excelentes opções para microgeração de energia renovável, pois utilizam, por exemplo, de pequenas correntezas de água e praticamente a degradação ambiental é inexistente. Não é necessária a construção de barragens, desta forma, esta tecnologia apresenta diversas vantagens.

Pela não dependência de grandes obras de engenharia, além do baixo custo ambiental, as turbinas hidrocínéticas não impactam a flora e faunas locais. Elas apresentam uma média de 30 anos de durabilidade, sem interromper a geração de energia, com poucas paradas para

manutenção. Suas instalações podem ser feitas em qualquer rio com correnteza, além de adaptações para aproveitamento de quedas d'água, pequenos desníveis, ou ainda, em instalações em séries para demandas maiores. Esse tipo de tecnologia pode beneficiar comunidades ribeirinhas que ainda não tem acesso à rede elétrica (VIANA, 2005).

Há, de modo geral, dois tipos de turbinas hidrocínéticas: Turbinas de eixo horizontal ou axial e a de eixo vertical. O eixo da turbina vertical é posicionado perpendicularmente ao fluxo da corrente e o da turbina horizontal é posicionado de maneira oposta.

A turbina de eixo vertical é a aplicação escolhida neste trabalho, pois como o fluxo permanece perpendicular ao eixo – sem depender da direção desse fluxo – a turbina sempre girará para a mesma direção, destacando como uma grande vantagem em relação aos outros tipos de turbinas. As turbinas de eixo verticais mais conhecidas são de Darrieus e Gorlov. Pode-se dizer que a turbina inventada por Alexander Moiseevich Gorlov é um projetado aperfeiçoado de Darrieus, proveniente de uma engenharia atualizada e mais eficiente, pois suas pás tem forma helicoidal que nessa configuração apresenta maiores rendimentos e menores vibrações, além de sempre existir uma pá em posição de receber o fluxo (VIANA, 2005).

Suas construções mecânicas são apresentadas nas Figuras 2 e 3.



Figura 2 – Turbina Darrieus. (GARCIA, 2006).



Figura 3 – Turbina Gorlov. (GARCIA, 2006).

A modelagem matemática aplicada ao tipo de turbina escolhida será apresentada em detalhes na metodologia.

Geradores síncronos

O eletromagnetismo proporcionou um amplo desenvolvimento e interação entre os campos da elétrica com a mecânica. Um dos elementos eletromecânicos são as máquinas rotativas. Os tipos mais conhecidos são as máquinas síncrona, indução e de corrente contínua.

Os métodos de conexão e excitação dos enrolamentos se diferem entre essas máquinas, mas o princípio de funcionamento é o mesmo; isto é, a tensão é gerada a partir do movimento de um campo magnético relativo a um enrolamento e o torque é produzido ao se interar com os campos magnéticos dos enrolamentos do estator e do rotor (FITZGERALD, 2014).

A finalidade de um motor elétrico é gerar energia mecânica quando uma tensão elétrica é aplicada nos terminais da máquina. Um gerador produz o processo inverso, ou seja, transforma a energia mecânica aplicada no eixo em energia elétrica.

Os geradores síncronos são aplicados em sistemas trifásicos, por exemplo, em hidrelétricas. Independente da fonte de potência mecânica, a velocidade deverá ser praticamente constante, devido à velocidade síncrona da máquina (CHAPMAN, 2013).

Notoriamente, nem toda potência entregue ao eixo da máquina síncrona se resulta em energia elétrica, pois há perdas no circuito elétrico, representadas pela diferença entre as potências de entrada e saída (CHAPMAN, 2013).

Essas perdas são apresentadas na Figura 4.

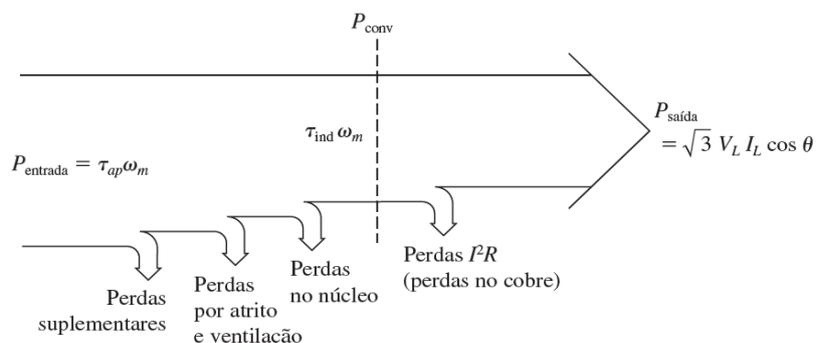


Figura 4 – Diagrama de fluxo de potência de um gerador síncrono. (CHAPMAN, 2013).

Os geradores síncronos se destacam nas eficiências, ou ainda, seu rendimento é um dos mais apropriados entre as máquinas rotativas, cuja operação é próxima dos 90%.

A WEG, empresa multinacional brasileira, apresenta um exemplo disso. Em seus catálogos, o gerador da Linha G i-Plus apresenta uma eficiência de 90,7%, o qual pode ser aplicado em sistemas hidráulicos. Nesse sentido, esse tipo de gerador se destaca pela sua eficiência em relação outras máquinas, apresentando poucas perdas (WEG, 2017).

Inversor de frequência e sistemas de conexão à rede elétrica

Faz-se necessário um sistema eletrônico capaz de corrigir a frequência e tensão de saída que será entregue à rede de energia. O inversor de frequência é fundamental nesse sistema e é conhecido como Off Grid – autônomo – ou On Grid – conectado na rede, que tem como modelo o Grid TIE.

O sistema Off-Grid foi concebidos para criar tensão alternada, a partir da energia acumulada em baterias. É usado em sistemas autônomos, ou seja, casas isoladas, barcos ou locais que não chegam energia elétrica e necessariamente não estão ligados à rede elétrica local (ELETRÔNICA PT, 2017).

O sistema On-Grid injeta uma tensão alternada, sem recursos de baterias, diretamente à rede de distribuição local. Permite vender energia elétrica, podendo alimentar outros

consumidores. A principal diferença entre os tipos de inversores, é que o Grid-TIE se interliga com a rede da concessionária, devido a sua capacidade de sincronizar a frequência e tensão de saída com a rede que se deseja ligar, sem fazer o uso de baterias e controlador de cargas, tornando-se um modelo vantajoso. Também, são capazes de se desligarem da rede da concessionária quando esta não fornece energia (falha na distribuição, blackout). Em ambos modelos, normalmente a energia é gerada por fontes solar e eólica (ELETRÔNICA PT, 2017).

Aplicação nos dias atuais

A empresa americana Lucid Energy se baseou na GHT para desenvolver uma turbina esférica como forma de aproveitar a água como fonte renovável; ou seja, utiliza o fluxo da água da distribuição e abastecimento de uma cidade, para implantar turbinas em séries capazes de gerar energia. A geração de energia é diretamente proporcional ao tamanho da turbina e à vazão da água. Uma ilustração deste projeto é apresentada na Figura 5.



Figura 5 – Projeto da empresa Lucid Energy. (ENERGY, 2017).

Evidentemente, pode-se considerar esse projeto um modelo ideal a ser aplicado em uma tubulação, pois, como se trata de uma turbina esférica, apresentará maior eficiência. A Figura 6 apresenta dados de vazão de água e potência gerada para este tipo de turbina.

Power Output & Water Flow Requirements



Figura 6 – Relação entre vazão de água e potência gerada. (ENERGY, 2017).

A instalação de quatro turbinas em série de 50 (kW), totalizando 200 (kW), em uma tubulação de 1050 (mm), gera 900 (MWh) por ano, suficiente para alimentar aproximadamente 100 casas e contribui para atingir o Plano de Ação Climática com energia renovável (ENERGY, 2017).

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de microgeração de energia elétrica através da turbina hidrocínética, conhecida como Turbina Helicoidal de Gorlov (GHT).

METODOLOGIA

Este trabalho avalia um estudo de impacto da microgeração hídrica acoplada no sistema de distribuição de água da cidade de Campinas – SP. A partir de um determinado fluxo de água, é possível determinar uma potência mecânica no eixo da turbina. Como o eixo é acoplado no gerador, foi possível estudar alguns comportamentos elétricos importantes, como também realizar um estudo de viabilidade. Também, há uma análise hipotética de geração anual e economia de energia, aplicando um modelo já existente e apropriado.

Para as finalidades supracitadas, o trabalho é organizado da seguinte forma: será apresentada a seguir a revisão bibliográfica, com uma breve contextualização histórica do uso da água e do surgimento da energia elétrica; depois será apresentada uma visão geral da energia elétrica no Brasil, distribuição de água no município de Campinas – SP e serão contextualizadas as turbinas hidrocínéticas, o gerador síncrono, uma abordagem dos tipos de inversor de frequência e um exemplo de aplicação que atualmente existe nos Estados Unidos como desfecho da primeira parte do trabalho.

Apresentaremos uma pesquisa de âmbito exploratório, baseado em artigos, casos e aplicações existentes.

A Figura 7 é um diagrama de componentes estruturais utilizados no trabalho, representando a metodologia adotada.

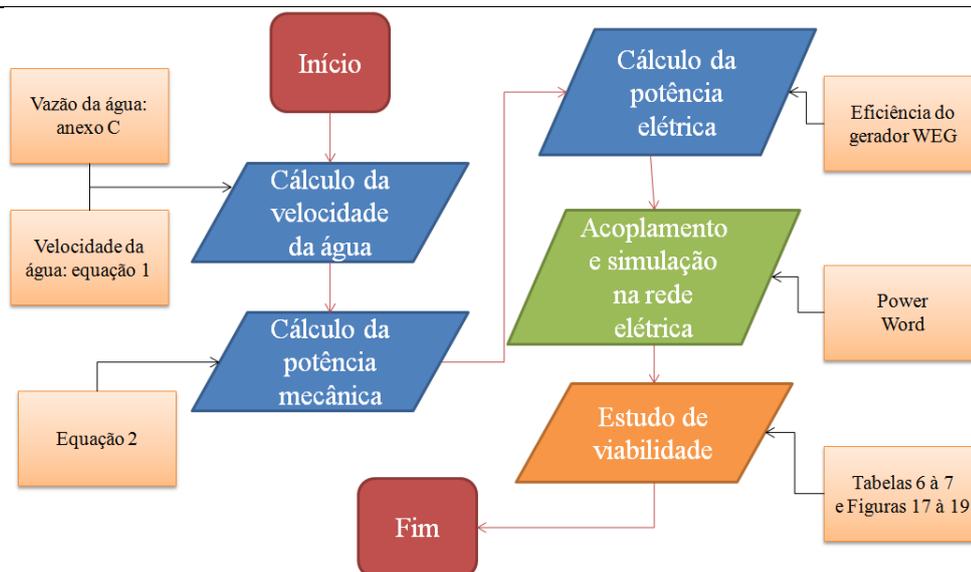


Figura 7 – Diagrama de entradas e saídas.

A modelagem de cada componente do sistema descrito acima será apresentada em detalhes nas subseções a seguir.

Cálculo da velocidade da água

Utilizando o cálculo da vazão, encontra-se a velocidade da água.

$$V = Q/A \quad (1)$$

Onde:

V – velocidade da água em (m/s);

Q – vazão da água em (m³/s);

A – área da tubulação em (m²);

Nesse caso, esse cálculo será tratado em um escoamento interno, ou seja, na adutora da ETA 4 da SANASA, adotada no trabalho. Baseando-se nas vazões máxima de 2,13 (m³/s) e mínima de 1,21 (m³/s), que são medições do dia 18 de Julho de 2017, coletas na visita técnica. A Tabela 1 mostra que essa adutora é a de maior capacidade da concessionária. Segundo a concessionária, a tubulação de saída da ETA tem 1,5 (m) de diâmetro interno.

Cálculo da potência mecânica

O cálculo da potência mecânica baseado no princípio de modelamento da GHT, é descrito por Gorlov conforme na Equação 2 (GORLOV, 2010):

$$Pt = 0,5 \eta \rho A V^3 \quad (2)$$

Onde:

Pt – é a potência da turbina em Watts (W);

η – eficiência da turbina (coeficiente potencial), $\eta = 0,35$ (máximo) de testes de laboratório. Esse teste é conhecido na Figura 8;

ρ – m/L^3 , (kg/m³) – densidade de massa da água, para $\rho = 1,000$ kg/m³;

$A = HD$ (área de fluxo cruzado da turbina helicoidal). H é a altura da turbina e D o diâmetro. Medidas aditadas na Figura 11;

V – velocidade da água em (m/s);

No artigo Development of the helical reaction hydraulic turbine, Gorlov apresenta um exemplo aplicando seu modelo no oceano Golfo, ou seja, em escoamento externo. Considerando a velocidade da água em 2,5 (m/s) e a área da turbina 0,865 (m²), encontra-se uma potência da turbina equivalente a 2,4 (kW). Interligando 656 turbinas em séries, a potência mecânica final equivale a 1,6 (MW) (GORLOV, 1998).

A Figura 8 apresenta um gráfico de eficiência da turbina encontrada pelo inventor nos testes realizados em laboratório.

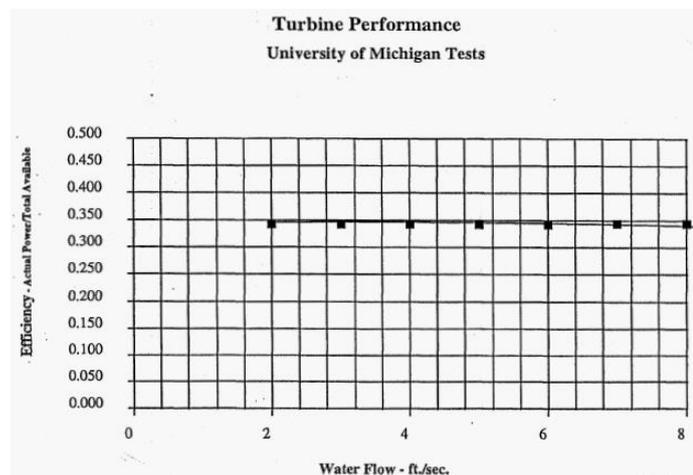


Figura 8 – Teste de eficiência da GHT. (GORLOV, 1998).

Cálculo da potência elétrica

A eficiência do gerador é dada através da relação da potência elétrica de saída e a potência mecânica de entrada aplicada no eixo da turbina, sabendo-se que para resultar em potência elétrica são consideradas as perdas elétricas do circuito interno, apresentada na Figura 4. Portanto, Gorlov aplicou esse princípio em seu exemplo dado na subseção anterior, onde, ao considerar a eficiência de um gerador elétrico igual a 85%, a potência de saída gerada equivale-se 1,36 (MW) (GORLOV, 1998).

Nessa pesquisa, foi utilizada a eficiência do gerador síncrono da WEG, apresentado anteriormente, equivalente a 90,7%. Nota-se que o trabalho não tem por finalidade modelar um gerador elétrico ideal, mas se baseou em uma aproximação do catálogo de aplicação do fabricante. Logo, as potências elétricas encontradas são resultados do produto da potência mecânica da turbina e eficiência do gerador WEG.

Acoplamento e simulação na rede elétrica

Os acoplamentos à rede de baixa tensão foram baseados a partir da vazão máxima de 2,13 (m/s), utilizando não só a GHT proposta no trabalho, com também uma estímulativa de utilização da turbina da empresa Lucid Energy.

Nas simulações se consideraram dois casos: crítico e normal. O caso crítico é o maior impacto no sistema elétrico causado pela conexão de geração num sistema elétrico no período em que ocorre o menor consumo de energia, conhecido como período de carga leve. Isto porque afeta a tensão no ponto de conexão, podendo causar sobretensão, além de elevação de perdas elétricas. Já o caso normal, foi simulado considerando uma carga equivalente à capacidade do transformador de distribuição. Essas informações foram apresentadas na visita à Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

É sugerido acoplar as gerações encontradas pelas turbinas diretamente à rede elétrica de BT no sistema On Grid.

Estudo de viabilidade

Foi elaborado um estudo de viabilidade, o qual tem por objetivo apresentar vantagens e desvantagens da turbina modelada. Foram evidenciadas algumas dificuldades encontradas durante o trabalho, sobretudo, por trabalhar com uma tecnologia ainda escasso de pesquisa, mas que merece futuros estudos e protótipos de testes.

Houve, também, uma análise de geração anual, baseando-se na Tabela 2, utilizando a turbina da Lucid Energy e suas relações apresentadas na subseção: aplicação nos dias atuais. Por fim, uma breve introdução de economia de energia representada em curvas típicas da CPFL, aplicando essa tecnologia.

Visitas técnicas

Visando à obtenção de dados, foram realizadas visitas técnicas à SANASA e a CPFL, concessionária de energia, responsável pela distribuição de energia elétrica no município de Campinas. Na SANASA foi possível conhecer todo o processo de distribuição de água e gráficos de fluxo no município de Campinas-SP. A visita à SANASA possibilitou conhecer um mapa de distribuição de água de Campinas e alguns gráficos, onde é possível identificar os horários de maior e menor vazão na ETA 4. Enfim, houve uma visita ao grupo CPFL Energia, onde foi apresentada a empresa e o princípio de funcionamento do sistema de distribuição.

Na visita à CPFL foi esclarecido que o acoplamento de qualquer tipo de mini ou microgeração à rede da CPFL necessita de uma análise de critérios e aprovação da companhia, devido a padrões de qualidade de energia elétrica exigidos na operação da rede, juntamente com critérios definidos na resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) N° 482 de 2012. Também, a Companhia forneceu curvas típicas de uma residência que consome até 100 (kWh) mensal, a qual foi utilizada no estudo de viabilidade para representar uma hipotética economia.

Softwares utilizados

O Excel, ampla ferramenta de elaboração e controle de planilha, foi utilizado para organizar e apresentar os dados.

O Solidworks é um software apropriado para projetos mecânicos. Ele foi utilizado para uma ilustração técnica básica das dimensões da turbina e tubulação.

O Power Word é um programa computacional específico para simulações de cálculos elétricos em regime permanente em sistemas elétricos. Por este software é possível simular o comportamento da rede de transmissão e distribuição na presença de geração distribuída e com isto ter subsídios para avaliar fluxo de potência, tensão, corrente, curto-circuito, seletividade e etc. O referido programa utiliza a potência base padrão de 100 (MVA) e apresenta os resultados tanto em pu (Por Unidade), como em valores reais. Para acoplamento do gerador à rede de distribuição de média tensão da CPFL, foi considerado um transformador de 30 (kVA). Ilustração da GHT e dimensões mecânicas adotada no trabalho estão apresentadas nas figuras 9, 10 e 11.

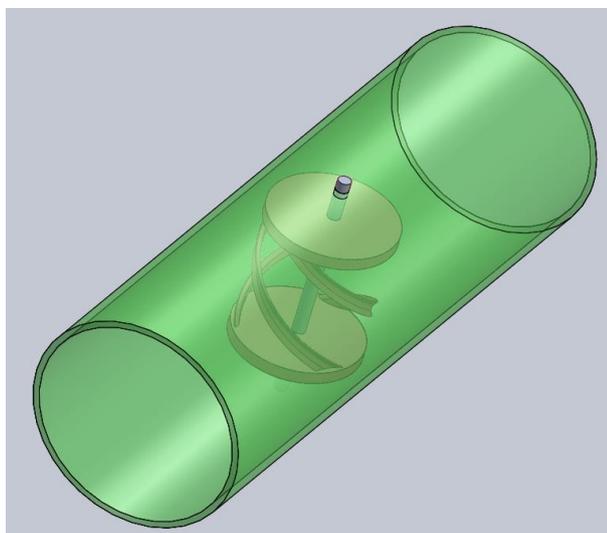


Figura 9 – Representação da aplicação.

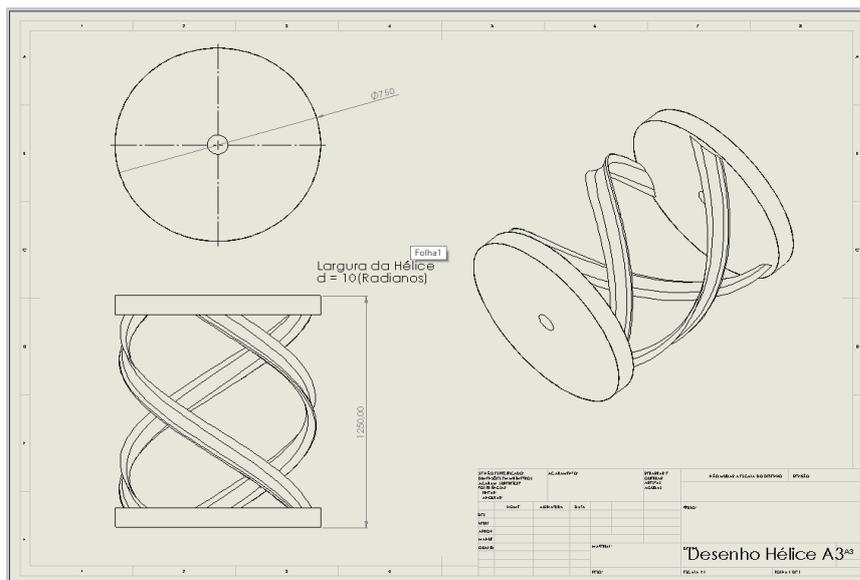


Figura 10 – Turbina GHT.

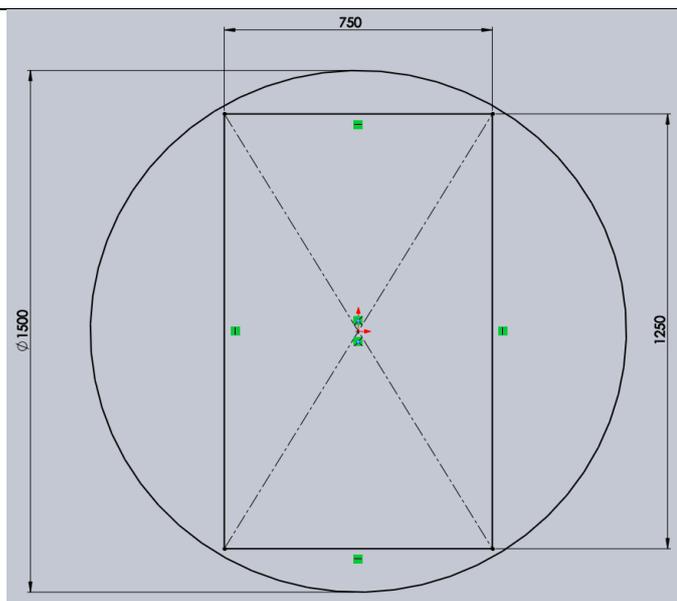


Figura 11 – Dimensões da GHT e tubulação da Sanasa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados de potências mecânica e elétrica da GHT

Aplicando as Equações 1 e 2, obtém-se os seguintes resultados para potência mecânica da GHT:

Tabela 3 – Relação entre vazão e potência mecânica.

DATAS	VAZÃO (m ³ /s)	POTÊNCIA MECÂNICA (W/s)
18/jul/17	1,21	51,72
18/jul/17	2,13	286,67

Logo, ao considerar a eficiência de 90,7% dos geradores síncronos da WEG e aplicando quatro GHT's em séries, é possível obter as potências elétricas geradas.

Tabela 4 – Relação entre vazão e potência elétrica.

DATAS	VAZÃO (m ³ /s)	POTÊNCIA ELÉTRICA (W/s)	4 GHT'S EM SÉRIE (W/s)
18/jul/17	1,21	46,61	187,65
18/jul/17	2,13	260	1040

A utilização das quatro turbinas em série é baseada na aplicação realizada pela Lucid Energy. Portanto, não será analisado se limita ou não o fluxo da água na tubulação, pois a ideia aplicada pela empresa é igual a possível aplicação na SANASA, isto é, a distribuição da água é por gravidade.

Acoplamento das potências elétricas na rede de baixa tensão

Apropriando-se, ainda, da vazão máxima de 2,13 (m³/s) da SANASA, é possível fazer uma relação entre a GHT e a turbina da Lucid Energy. Nesse caso, será utilizada uma turbina de capacidade de 100 (kW), Figura 6, devido ao diâmetro requerido pela empresa de 1,5 (m) ser o mesmo da SANASA. Com isso, chega-se nas seguintes potências aplicando uma relação entre a GHT e Lucid Energy :

Tabela 5 – Relação entre vazão e potência elétrica.

DATAS	VAZÃO (m ³ /s)	4 GHT'S EM SÉRIE (kW/s)	1 LUCID ENERGY EM SÉRIE (kW/s)
18/jul/17	2,13	1,04	37,5

Foi escolhida uma turbina da Lucid Energy para atender os requisitos de acoplamento direto à rede de baixa tensão, por ser microgeração. Se fossem consideradas quatro turbinas, poderiam ser acopladas na rede de média tensão. Sob o aspecto de impacto na rede, a tecnologia da Lucid é a que mais afeta e, assim, é muito mais eficiente em comparação com a GHT.

Com os dados da tabela 5, torna-se possível a simulação em regime permanente com o uso Power Word, realizando o acoplamento geração à rede de baixa tensão. Foram realizadas as seguintes simulações, divididos em três casos: a) Sistema sem geração, com carga; b) Sistema com geração sem carga – equivale ao período de carga leve; c) Sistema com geração e com carga máxima – equivale ao período de carga pesada.

Para cada caso, foram consideradas as duas tecnologias (GHT e Lucid).

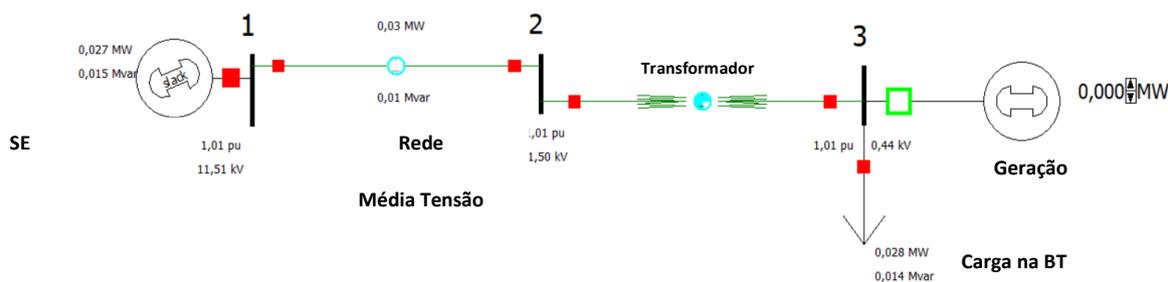


Figura 12 – Sistema configurado em carga pesada com turbina desacoplada.

Na Figura 12, todo fluxo de potência é proveniente do sistema. Nota-se que, na Figura 13, com a geração GHT, toda potência gerada passa pelo transformador e a tensão não é afetada.

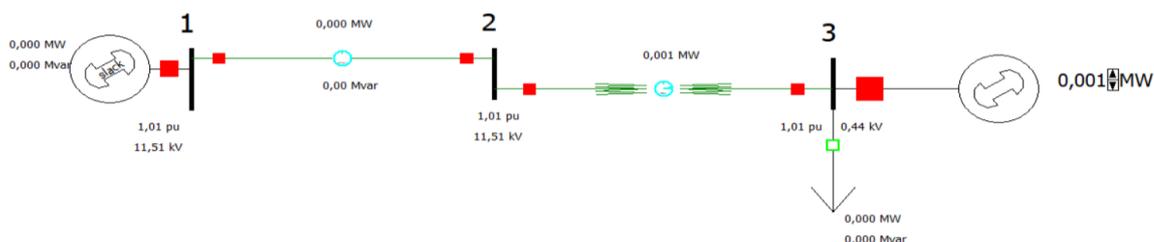


Figura 13 – Sistema configurado em carga leve com turbina GHT acoplada.

Já na Figura 14, toda potência gerada pela Lucid passa pelo transformador, acima da sua capacidade nominal. Há fluxo de potência inversa para o sistema, sem ainda afetar a tensão.

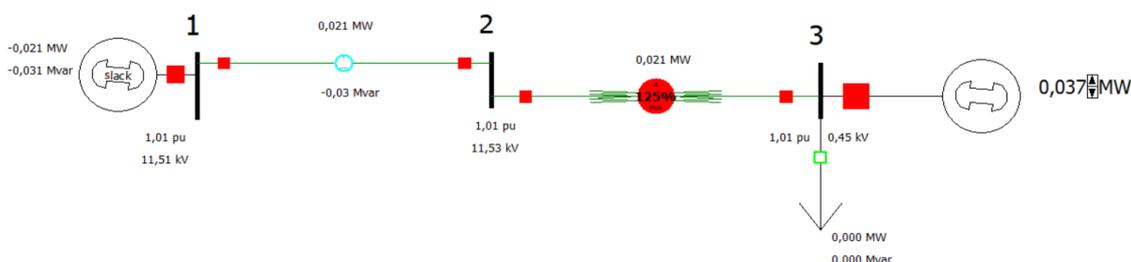


Figura 14 – Sistema configurado em carga leve com turbina Lucid acoplada.

A partir da Figura 15, nota-se que a geração pouco influi no fluxo de potência vindo do sistema supridor e a tensão não sofre alteração.

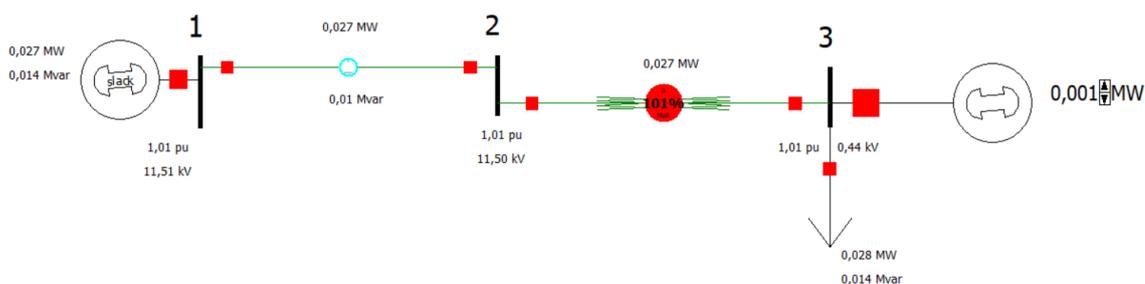


Figura 15 – Sistema configurado em carga pesada com turbina GHT acoplada.

Na Figura 16, a potência gerada pela turbina Lucid é totalmente entregue à carga. O Transformador não sofre sobrecarga e a tensão também não é afetada.

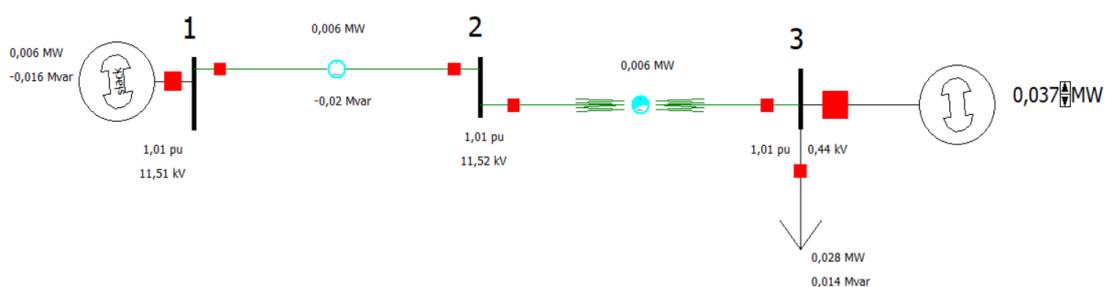


Figura 16 – Sistema configurado em carga pesada com turbina Lucid acoplada.

A Figura 12 representa um sistema de distribuição de média tensão, cuja fonte supridora é regulada em 11,4 (kV) \pm 1%. Nessa rede, há um transformador abaixador de 30 (kVA), adotado na metodologia. Os símbolos na cor verde representam disjuntores abertos, enquanto a cor vermelha, disjuntores fechados.

Os resultados das simulações computacionais, Figuras de 13 a 16, mostram que, para estas gerações, não há impactos negativos ao se acoplar um sistema de geração à rede de baixa tensão. Como esperado, os resultados mostram que a geração utilizando a turbina de Gorlov tem uma contribuição irrelevante no sistema, devido à sua reduzida eficiência, ao

contrário da turbina da Lucid que promove resultados mais expressivos, sem ainda afetar a tensão no ponto de conexão.

Viabilidade

Evidentemente, a GHT utilizada na pesquisa foi uma adaptação, pois se apropriou de um modelo existente, aplicado em escoamento externo, que se adaptou ao escoamento interno. Faz-se necessário um aprofundamento à ciência de mecânica dos fluídos para modelar um tipo de turbina ideal a ser aplicada em tubulações. Também, seria interessante um protótipo para observar com mais detalhes o funcionamento e comportamento da adaptação hipoteticamente realizada com a GHT.

O equacionamento da Lucid Energy não é de domínio público, pois se trata de uma patente. Porém, uma hipotética relação a ser feita é se basear na aplicação da Lucid Energy, utilizando a turbina de 50 (kW) da Figura 6 e as vazões de 2011, amostrada na Tabela 2 pela SANASA. Com isso, é possível estimar a geração total em Campinas – SP se utilizasse essa aplicação. Logo, considerando o volume tratado em (m³/ano) na Tabela 2 e transformando em (m³/s) por ano, cada unidade de distribuição da SANASA terá:

Tabela 6 – Vazão média tratada em (m³/s) no ano de 2011.

UNIDADES	VAZÃO MÉDIA (m ³ /ano)	VAZÃO MÉDIA (m ³ /s) por ano
ETA 1	10.733.661,00	0,340
ETA 2	8.960.987,00	0,284
ETA 3 E 4	78.417.264,00	2,487
ETA CAPIVARI	6.606.178,00	0,209
POÇOS	130.921,00	0,004

Como na Tabela 6 foi possível transformar a vazão média anual em uma vazão média por segundo, pode-se então, prever a disponibilidade de potência e energia. Nesse sentido, aplicando o conceito da Lucid Energy, a qual utiliza quatro turbinas em série, no total de 200 (kW), em uma tubulação de 1050 (mm), e fazendo uma relação entre a capacidade máxima gerada pela turbina com as vazões médias da SANASA, chegam-se às potências elétricas que poderiam ser disponibilizadas nas unidades da SANASA indicadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Potência disponibilizada para 200 (kW) da Lucid Energy em cada unidade. Base 2011.

UNIDADES	VAZÃO MÉDIA (m ³ /s)	POTÊNCIA GERADA EM (W/s)	GERAÇÃO DE 2011 EM (MWh) por ano
ETA 1	0,340	25.185,19	220,62
ETA 2	0,284	21.037,04	184,28
ETA 3 E 4	2,487	184.222,22	1.606,25
ETA CAPIVARI	0,209	15.481,48	135,62
POÇOS	0,004	296,30	2,60

Com esses resultados, pode-se gerar o seguinte gráfico.

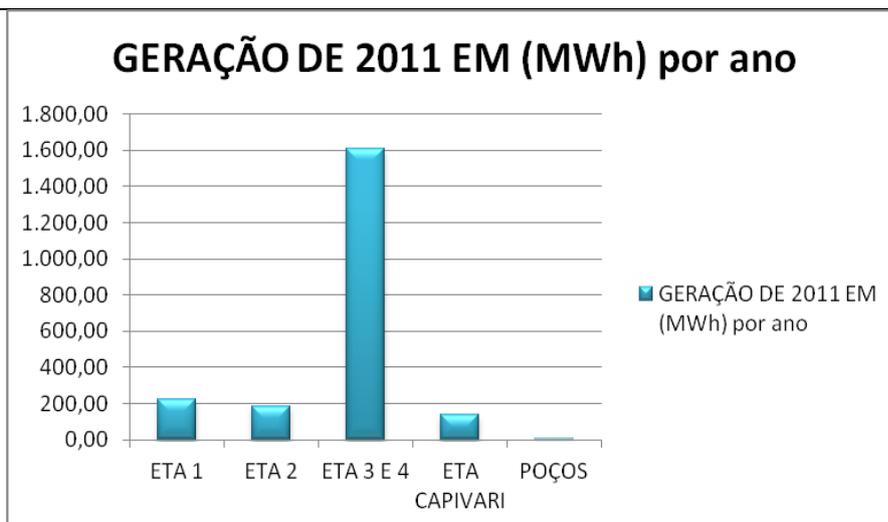


Figura 17 – Potência total gerada pela turbina Lucid no ano de 2011 em cada unidade da SANASA.

A partir da Tabela 7, é possível estimar a quantidade de casas que essa geração alimentaria, conforme é apresentado na Tabela 9.

Tabela 8 – Quantidades de casas de alto e médio consumo alimentadas com tecnologia Lucid Energy.

GERAÇÃO TOTAL DE 2011 EM (MWh)	CASAS QUE CONSOMEM 750 (kWh) POR MÊS	CASAS QUE CONSOMEM 150 (kWh) POR MÊS
2.149,37	238	1.190

Por fim, aplicando a curva típica, fornecida na visita à CPFL, de uma residência de até 100 (kWh) por mês, é possível notar uma economia. Abaixo, a Figura 18 representa a curva típica comum antes de acoplar qualquer tipo de microgeração.

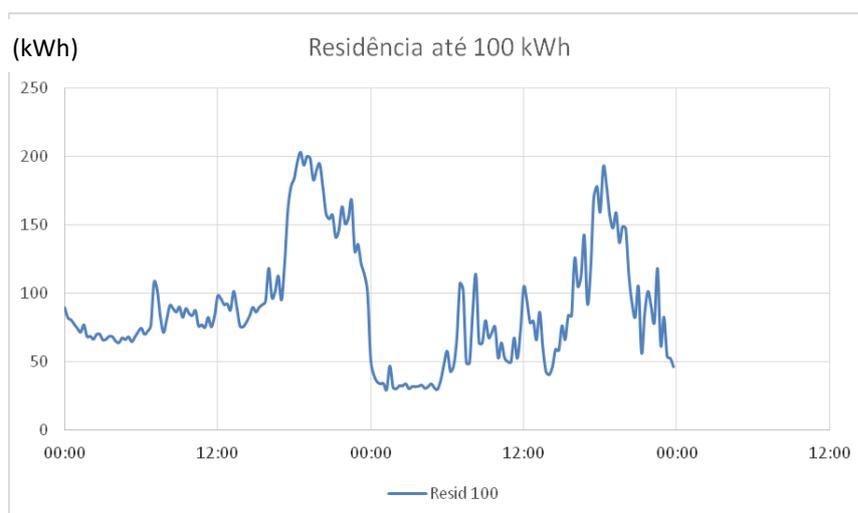


Figura 18 – Curva típica padrão da CPFL para uma residência de até 100 (kWh) por mês.

Nota-se que o pico de consumo de energia atinge 200 (kWh) por mês. Na Figura 19, é estimada uma contribuição constante de uma microgeração hídrica equivalente a 20%, ou

seja, 20 (kWh) por mês. Assim, esse pico cairá para aproximadamente 160 (kWh) por mês, resultando não só em uma economia ao consumidor, como também aliviando a rede elétrica.

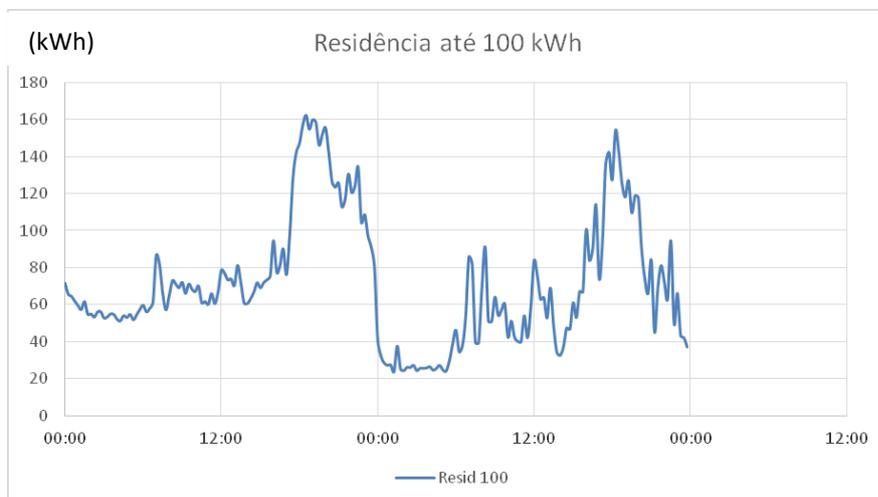


Figura 19 – Curva típica padrão da CPFL com contribuição de 20 (kWh) da microgeração hídrica.

CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou um modelo de microgeração hídrica acoplada ao sistema de distribuição de água, visando contribuir para uma produção energética sustentável e eficiente.

O modelo proposto foi baseado na turbina GHT devido a sua disponibilidade de informações, conforme foi apresentado ao longo do trabalho.

Para tais finalidades, o modelo proposto foi simulado numa rede de baixa tensão de Campinas – SP, com a turbina sendo instalada na ETA 4 da SANASA.

Os resultados apresentados indicam que não há impactos negativos ao se acoplar um gerador à rede de baixa tensão e ainda há uma contribuição, ajudando a aliviar a rede, sobretudo, aplicando a turbina da Lucid Energy, pois se trata de uma tecnologia consolidada. Também, a viabilidade, analisada de maneira macroscópica, da instalação da tecnologia Lucid Energy ou de um modelo ideal compatível, indica que traz economia e benefícios ao consumidor e a concessionária de energia.

Um futuro trabalho, com o objetivo de aperfeiçoar essa tecnologia e se tornar real, seria: modelo de turbina hidrocínética apropriada para instalação em tubulação de água.

Visando um aprofundamento na pesquisa realizada, é possível fazer um refinamento nos resultados finais encontrados, sobretudo, o de um modelo ideal de turbina a ser acoplada em tubulações. Também, é possível estudar projetos da GHT para implantação nas tubulações do campo residencial, comercial e industrial. Pode-se estudar a implantação em sistemas de gás, resfriamento e climatização, como por exemplo, os chillers, o qual é um sistema de resfriamento de água, que opera através de um determinado fluxo de água. No campo social, é possível estudar a implantação em comunidades que ainda não possuem acesso à energia elétrica, utilizando-se de recursos naturais como rios e quedas d'água sem afetar a natureza, assim, oferecer benefícios sustentáveis ao homem e a natureza.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Brasília, 2015.

CALIXTO, Bruno. **Energia eólica decola no Brasil; Solar continua engatinhando**. 2016. Disponível em: <<http://epoca.globo.com>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

CPFL, Companhia Paulista de Força e Luz. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br>>. Acesso em: 22 out. 2017.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5º ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2013.

ELETRONICA PT. **Inversor de energia solar e energia eólica**. Disponível em: <<https://www.electronica-pt.com>>. Acesso em: 09 out. 2017.

ENERGY, Lucid. **How it works**. Disponível em: <<http://lucidenergy.com>>. Acesso em: 04 maio. 2017.

FITZGERALD, A. E.; Kingsley Jr, C.; Kusko, A. **Máquinas Elétricas**. 7º ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2014.

FOX, R. W.; Pritchard, P, J.; McDonald, A, T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GARCIA, S. B.; SIMIONI, G. C. S.; ALÉ, J. A. V. Aspecto de desenvolvimento de turbina de eixo vertical. **IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Recife, ago. 2006.

GORLOV, Alexander. **Development of the helical reaction hydraulic turbine**. MIME Department Northeastern University. Boston, ago, 1998.

GORLOV, Alexander. **Helical Turbine and Fish Safety**. Mechanical Engineering Department Northeastern University. Boston, ago, 2010.

JURISWAY, Sistema Educacional Online. **A evolução histórica do uso da água**. Disponível em: <<https://www.jurisway.org.br>>. Acesso em: 20 out. 2017.

MME, Ministério de Minas e Energia (BR). **Renováveis devem manter participação de 43% na matriz energética em 2017**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 20 out. 2017.

LEAL, Ubiratan. **A Alemanha gerou tanta energia limpa que pagou para que a usassem**. Disponível em: <<http://outracidade.uol.com.br>>. Acesso em: 20 out. 2017.

SANASA. **SANASA**. Disponível em: <<http://www.sanasa.com.br>>. Acesso em: 06 out. 2017.



<http://ensaios.usf.edu.br>

VIANA, Fabiana Gama. Turbinas Hidrocinéticas são alternativas na geração energia elétrica no país. **PCH Notícias & SPH News**. Itajubá, n°.26, p.14-18, jun/jul/ago. 2005.

WEG. DT-5 Características e especificações de geradores. Disponível em: <<http://www.weg.net>>. Acesso em: 09 out. 2017.

Publicado em 17/12/2019