

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELO DE AVALIAÇÃO DE IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM  
EDIFICAÇÕES UNIVERSITÁRIAS EM PORTO ALEGRE**

por

Luís Eduardo Patussi Bertol

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018

**MODELO DE AVALIAÇÃO DE IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM  
EDIFICAÇÕES UNIVERSITÁRIAS EM PORTO ALEGRE**

por

Luís Eduardo Patussi Bertol

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e fenômenos de transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Eng<sup>a</sup>. Jussara Issa Musse

Porto Alegre, 15 de junho de 2018.

Bertol, L.E.P. **MODELO DE AVALIAÇÃO DE IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM EDIFICAÇÕES UNIVERSITÁRIAS EM PORTO ALEGRE.** 2018. 17. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018

## **RESUMO**

No final de 2017, o valor da tarifa de energia aumentou cerca de 30% em Porto Alegre. Devido à Lei Orçamentária Anual de 2017, que restringe a atualização dos valores repassados às universidades, os gastos com eletricidade passaram a representar uma parcela ainda maior das despesas das universidades. A redução nos custos com eletricidade da universidade pode ser obtida pela utilização de fontes alternativas, como painéis fotovoltaicos e sistemas de cogeração. Foi proposta uma metodologia capaz de selecionar prédios da UFRGS candidatos a implementação de geração distribuída, tendo em vista que a universidade busca formas de reduzir seus gastos com eletricidade. A partir do perfil de consumo, área disponível e orientação azimutal, foi estimada a produção de energia elétrica a partir de três fontes: painéis solares fotovoltaicos, utilização de motor à combustão interna alternativo e motor à combustão interna rotativo e possíveis combinações na forma de sistema híbrido (solar e motor à combustão interna alternativo ou solar e motor à combustão interna rotativo), resultando em cinco possíveis soluções. Foi realizado um fluxo de caixa simples para analisar a viabilidade financeira de todas as formas de geração de energia elétrica. A ferramenta foi analisada em um caso baseado no perfil de consumo disponível de um prédio universitário, tarifas da CEEE e uma dada área com sua orientação azimutal. Os resultados mostraram que a implementação de um sistema de geração utilizando motor à combustão interna alternada e um sistema híbrido composto por painéis solares e motor à combustão interna alternada é financeiramente viável, apresentando tempo de retorno de 3 e 5 anos, respectivamente. A implementação de sistema solar fotovoltaico não se mostrou viável economicamente. O percentual de energia produzida em relação à energia consumida é de apenas 2,2%. A utilização de motores à combustão interna rotativo atende às necessidades energéticas. Contudo, não é viável financeiramente devido ao alto custo de implementação. A justificativa do estudo se mostra pertinente frente aos resultados ao analisar a sensibilidade da ferramenta de acordo com as diferentes formas de geração de energia elétrica, das tarifas para energia elétrica utilizadas e dos valores propostos na implementação de cada sistema gerador. Dessa forma, diante dos frequentes aumentos das tarifas e redução no custo dos equipamentos, a implementação de projetos de geração distribuída tende a se tornar mais viável. A ferramenta cumpre com a sua proposta de analisar a viabilidade de implementação de geração distribuída a partir dos dados de entrada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema fotovoltaico, geração distribuída, motogerador, turbogerador.

Bertol, L.E.P. **SELECTION MODEL FOR DISTRIBUTED GENERATION IMPLEMENTATION IN UNIVERSITY BUILDINGS IN PORTO ALEGRE.** 2018. 17. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## ABSTRACT

At the end of 2017, the electricity fare increased 30% in Porto Alegre. Due to the Annual Budget Constraint Law of 2017, which restricts the restatement of budget of universities, the expenses with electricity fares became even a more important factor for these universities budgets. The cost reduction with electricity can be reached with the implementation of alternative energies usage, such as photovoltaic panels and cogeneration systems. It was proposed a methodology to analyse university buildings that are able to receive this distributed generation, once universities search for ways to reduce electricity costs. According to the consumption profile, the available area and azimuth orientation, the electrical generation was estimated according to three different sources: solar panels, alternate internal-combustion engine, rotate internal-combustion engine or a hybrid system, combining solar energy with one of the other two internal combustion engines, in a total of five possible solutions. It was made a cash flow study for each of the five cases, in order to analyse the economic feasibility. The tool was analysed with a hypothetical case, based on the consumption profile of a university building, CEEE's fares and the azimuth orientation of a certain area. The results have shown that the implementation of electricity generation using an alternate internal-combustion engine or a hybrid system composed by both alternate internal-combustion and solar panels are economically feasible, returning the investment in three and five years, respectively. The implementation of solar panels is not economically feasible, once the rate of generated electricity regarding electricity usage is about only 2.2%. The employment of rotate internal-combustion engines meets the electricity needs, however, it is not economically feasible due to high implementation costs. This study is justified based on its sensitivity whenever changing generating systems, the energy fares used and to the implementation costs. In face of frequents increases in the dares and the regular reductions on technology prices, the implementation of distributed generation projects will become more feasible. This tool works according to its purpose which aims analyse the feasibility of distributed generation based on the input data.

**KEYWORDS:** Photovoltaic system, distributed generation, moto generator, turbo generator.

## ÍNDICE

<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Questão do trabalho .....	2
1.3 Objetivo geral.....	2
1.4 Objetivos específicos .....	2
<b>2. Fundamentação Teórica</b> .....	2
2.1 Geração distribuída.....	2
2.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SFCR's .....	3
2.2.1 Dimensionamento da energia produzida pelo sistema fotovoltaico em função de uma dada área.....	3
2.2.2 Influência do ângulo de azimute .....	5
2.3 Sistema de cogeração .....	5
2.3.1 Dimensionamento de um motor à combustão interna para ser utilizado na cogeração .....	6
<b>3. Metodologia</b> .....	6
3.1 Geração de energia considerando implementação de um sistema solar fotovoltaico .....	7
3.1.2 Análise financeira .....	9
3.2 Geração de energia considerando implementação de um motor à combustão interna .....	9
3.2.2 Análise financeira .....	11
3.3 Geração de energia considerando implementação de um sistema híbrido solar fotovoltaico e motor à combustão interna.....	11
3.3.1 Análise financeira .....	12
<b>4. Aplicação da metodologia em um estudo de caso e discussão dos resultados</b> .....	12
<b>5. Conclusão</b> .....	13
<b>6. Trabalhos Futuros</b> .....	14
<b>Referências bibliográficas</b> .....	14
<b>APÊNDICE A – Fluxograma demonstrando a obtenção da energia elétrica total gerada pelos sistemas fotovoltaicos</b> .....	16
<b>APÊNDICE B – Média das alíquotas de ICMS, PIS e COFINS para os últimos 12 meses</b> .....	16
<b>APÊNDICE C – Consumos remanescentes após implementação de sistema solar fotovoltaico</b> .....	16
<b>APÊNDICE D – Consumos remanescentes após implementação de sistema de geração utilizando motor à combustão interna</b> .....	16
<b>APÊNDICE E – Consumos remanescentes após implementação de sistema híbrido de geração utilizando motor à combustão interna e sistema solar fotovoltaico</b> .....	16
<b>ANEXO A – Tarifas aplicadas pela Sulgás e dados técnicos sobre o gás natural</b> .....	16

## 1. Introdução

### 1.1 Motivação

O valor da fatura de energia elétrica aumentou cerca de 30% no final de 2017 para os consumidores de Porto Alegre. Uma forma de redução desse encargo pode ser obtida com utilização de sistemas que operem com fontes alternativas, como os sistemas fotovoltaicos, e, também, com equipamentos de autoprodução, como motogeradores e turbogeradores. Devido, à Lei Orçamentária Anual de 2017, que restringe a atualização dos valores repassados às universidades públicas, os gastos com eletricidade passaram a representar uma parcela ainda maior das despesas.

Desde a implantação da Resolução Normativa ANEEL nº 482, em 17 de abril de 2012, é possível ao consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada. Por intermédio dessa resolução, foi criado um sistema de compensação de energia elétrica, no qual a energia ativa injetada na rede é cedida, por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e, posteriormente, compensada com o consumo de energia elétrica ativa.

Basrawi, Yamada e Obara, 2014, realizaram a análise econômica e ambiental de um sistema híbrido fotovoltaico juntamente com microturbina a gás, sob diferentes estratégias de operação. Segundo os autores, a energia solar é uma das mais sustentáveis e abundantes, e a tecnologia fotovoltaica está se tornando mais barata. Contudo, mesmo com a redução do preço, essa tecnologia não deverá penetrar profundamente, no mercado de geração, devido à sua barreira técnica: intermitência na geração devido ao ciclo anual, ao ciclo dia/noite e à presença de nuvens.

A utilização de sistema fotovoltaico, juntamente com turbinas de cogeração, foi discutida por Comodi *et al.*, 2015, que justificaram o uso das duas tecnologias pelos seus comportamentos ao longo do dia. Segundo os autores, o sistema fotovoltaico é caracterizado por uma curva de produção em formato de sino, atingindo seu pico nas horas centrais do dia. A microturbina, por sua vez, tem sua curva de produção em função da temperatura, pressão e umidade relativa do ar ambiente, ao contrário do sistema fotovoltaico, sendo que o parâmetro mais influente na performance da máquina é a temperatura ambiente (maior a temperatura, menor a produção). Como a temperatura do ar ambiente e a radiação solar têm curvas de comportamento semelhantes, o uso de um sistema híbrido, fotovoltaico e microturbina a gás, aparece como uma oportunidade.

Um estudo termodinâmico sobre um sistema híbrido, baseado em energia solar e gaseificação do carvão, foi feito por Ozturk e Dincer, 2013. Os autores concluíram que sistemas de produção híbridos possuem maior eficiência por integrarem sistemas de recuperação da maior parte da energia fornecida.

Sonar e Sharma, 2013, discutiram a importância da trigeração como forma alternativa de geração. Segundo os autores, combustíveis alternativos garantem desenvolvimento sustentável, conservação de energia, eficiência e preservação ambiental, cujos benefícios podem atingir as metas de redução de CO<sub>2</sub> do protocolo de Kyoto e da Agenda 21.

A avaliação do potencial de geração de energia fotovoltaica, nos campi da UFRGS, e a análise financeira foram realizados por Cascaes, 2016. Realizando a análise em softwares livres, foi estimada a geração de energia para um ano. O campus do Vale, sozinho, é capaz de gerar 13% da necessidade de energia da universidade. Financeiramente, todos os cenários analisados foram promissores, apresentando retorno do investimento antes do fim da vida útil dos equipamentos. O presente trabalho propõe uma metodologia de avaliação da implementação de geração distribuída em prédios universitários de Porto Alegre, tendo em vista que as universidades buscam formas de reduzir seus gastos com eletricidade. Assim, justifica-se o presente estudo diante do potencial solar disponível, da presença de

geradores de energia elétrica a gás natural com alta eficiência energética, e do comportamento complementar dessas tecnologias. Esta ferramenta não visa substituir uma auditoria energética, que demanda tempo e recursos; procura antecipar-se a ela.

## 1.2 Questão do trabalho

É possível criar uma metodologia de avaliação da implementação de geração distribuída em edificações universitárias, a partir do seu perfil de carga, sua área disponível e sua orientação azimutal?

## 1.3 Objetivo geral

Propor uma metodologia capaz de avaliar a implementação de geração distribuída, analisando seu perfil de carga, sua área de telhado disponível e sua orientação azimutal.

## 1.4 Objetivos específicos

- Estimar a produção de energia elétrica, através de sistemas fotovoltaicos, em função da superfície disponível e sua posição azimutal e analisar a viabilidade financeira;
- Estimar a geração de energia elétrica com a utilização de motores à combustão interna alternativos (motogerador) e rotativos (turbogerador), e analisar suas respectivas viabilidades financeiras;
- Investigar se alguma das formas de geração supracitadas ou alguma combinação (solar fotovoltaico e motor à combustão interna alternativo ou solar fotovoltaico e motor à combustão interna rotativo) viabiliza a implementação de geração distribuída.

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1 Geração distribuída

Em vigor desde 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa da ANEEL nº 482, permite a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis (hidráulica, fotovoltaica, eólica ou biomassa), ou cogeração qualificada. Permite, também, fornecer o excedente para a rede de distribuição. É classificada como geração distribuída qualquer central geradora conectada à rede de distribuição, por meio de instalação de unidade consumidora, cuja potência de geração instalada não exceda 5 MW). Denomina-se microgeração, a central cuja capacidade de geração não exceda 75 kW; minigeração, quando a capacidade de geração está entre 75 kW e 5 MW. Caso haja energia excedente, ou seja, a produção de energia for maior que o consumo, ela será convertida em créditos de energia, que possuem validade de até 60 meses para serem utilizados. Os créditos de energia não podem ser revertidos em dinheiro.

São caracterizadas como consumidores pertencentes ao “grupo A” as unidades cuja tensão fornecida é igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas por sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, e cuja tarifação é binômica – em função da demanda contratada e do consumo de energia elétrica. Assim, deve ser cobrado, no mínimo, o valor referente à demanda contratada, no caso de a geração suprir todo o consumo.

As unidades consumidoras, cuja tensão fornecida é igual ou superior a 2,3 kV, pertencem ao “grupo A”. Nesse caso, a tarifação é binômica – em função da demanda contratada e do consumo de energia elétrica. O consumo é dividido de acordo com o posto tarifário – consumo no horário ponta e consumo no horário fora de ponta. O horário de ponta é compreendido das 18 às 21h.

Para os consumidores do grupo A que passam a gerar sua própria energia elétrica, o

faturamento é realizado deduzindo do consumo do posto tarifário a energia gerada no mesmo posto tarifário. Na hipótese de haver energia excedente em um posto tarifário, é possível compensar o consumo de energia no outro posto. Contudo, deve ser observada a proporção entre os valores das tarifas de energia (TE) para ambos, uma vez que a energia no horário de ponta é mais cara que a do horário fora de ponta.

## 2.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SFCR's

Conforme Urbanetz, 2010, SFCR's são geradores de energia elétrica constituídos basicamente pelo painel fotovoltaico e pelo inversor de frequências. Não são utilizadas baterias para armazenamento de energia elétrica. Como toda energia gerada produzida é colocada em paralelo com a rede elétrica da concessionária, essa é vista como o elemento armazenador. Ainda, segundo o autor, destaca-se a elevada produtividade, baixa manutenção e contribuição para a diversificação da matriz elétrica do país.

### 2.2.1 Dimensionamento da energia produzida pelo sistema fotovoltaico em função de uma dada área

A estimativa da geração de energia elétrica, através de energia solar fotovoltaica, pode ser feita em função da área disponível. Deve ser respeitado um distanciamento entre as linhas de painéis, para evitar o sombreamento de uma linha de painéis sobre a linha adjacente, conforme pode ser visto na figura 2.1.

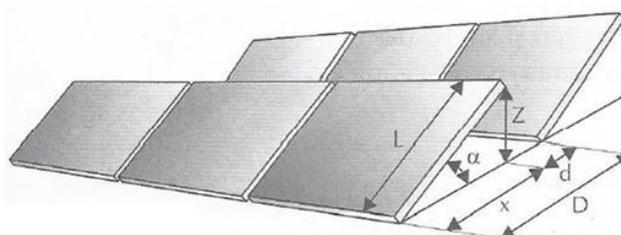


Figura 2.1 Distância para se evitar o sombreamento de um painel no outro. (Cascaes, 2016).

Cascaes, 2016, calculou o distanciamento entre linhas de painéis da seguinte maneira:

$$D = L (\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha) \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, o distanciamento  $D$  é obtido em metros,  $L$  é a largura do módulo, também em metros, e  $\alpha$  a sua inclinação, em graus. Respeitando-se o afastamento entre linhas, é possível obter a quantidade total de painéis em uma área.

A energia produzida é estimada através do modelo polinomial de potência. Zilles *et al.*, 2012, descrevem o procedimento de obtenção da energia produzida em função da radiação solar incidente no plano do painel e da temperatura de operação das células. Primeiramente, deve-se calcular a máxima potência do módulo. Ela é obtida através da Equação (2.2):

$$P_{mp} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp}(T_C - T_{C,ref})] \quad (2.2)$$

na qual  $P_{mp}$  é a máxima potência fornecida pelo gerador para as dadas condições, em [kW];  $P_{FV}^0$  é a potência nominal do gerador fotovoltaico (foi utilizado o valor de 310 W neste trabalho);  $H_{t,\beta}$  é a irradiância incidente no plano do gerador, dada em [W/m<sup>2</sup>];  $\gamma_{mp}$  é o coeficiente de temperatura do ponto de máxima potência, em [%/°C];  $T_C$  é a temperatura equivalente de

operação das células, dado em [°];  $T_{C,ref}$  é a temperatura de referência e  $H_{ref}$  corresponde à irradiância de referência, cujos valores são 25 °C e 1000W/m<sup>2</sup>, respectivamente.

A temperatura da célula  $T_c$  é obtida através da Equação (2.3):

$$T_c = T_a(^{\circ}\text{C}) + H_{t,\beta} \left( \frac{\text{w}}{\text{m}^2} \right) \left( \frac{T_{NOC} - 20(^{\circ}\text{C})}{800 \left( \frac{\text{w}}{\text{m}^2} \right)} \right) 0,9 \quad (2.3)$$

sendo  $T_a$  a temperatura ambiente medida, em [°C];  $H_{t,\beta}$  a irradiância incidente no plano do gerador, dada em [W/m<sup>2</sup>] e TNOC a temperatura nominal de operação da célula em [°C].

Contudo, a máxima potência gerada pelo painel fotovoltaico não representa o valor real da energia gerada, pois é necessário contabilizar as perdas no seguimento do ponto de máxima potência pelo inversor.

As perdas assumem os seguintes valores:

$$P_{mp} < 0,2 (P_{INV}^0 / \eta_{100}); \eta_{SPMP} = 85\% \quad (2.4)$$

$$P_{mp} \geq 0,2 (P_{INV}^0 / \eta_{100}); \eta_{SPMP} = 98\% \quad (2.5)$$

onde  $P_{INV}^0$  é a potência nominal do inversor, em [kW] e  $\eta_{100}$  é a eficiência de conversão do inversor a 100% da potência nominal.

A eficiência da conversão c.c./c.a. é uma função dependente do autoconsumo e do carregamento do inversor, a qual é contabilizada pelos parâmetros  $k_0$ ,  $k_1$  e  $k_2$ , os quais são dependentes das eficiências de conversão do inversor a 10%; 50% e 100% da potência nominal, e os quais se relacionam através das seguintes equações:

$$k_0 = \frac{1}{9} \frac{1}{\eta_{100}} - \frac{1}{4} \frac{1}{\eta_{50}} + \frac{5}{36} \frac{1}{\eta_{10}} \quad (2.6)$$

$$k_1 = -\frac{4}{3} \frac{1}{\eta_{100}} + \frac{33}{12} \frac{1}{\eta_{50}} - \frac{5}{12} \frac{1}{\eta_{10}} \quad (2.7)$$

$$k_2 = \frac{9}{20} \frac{1}{\eta_{100}} - \frac{5}{2} \frac{1}{\eta_{50}} + \frac{5}{18} \frac{1}{\eta_{10}} \quad (2.8)$$

nas quais  $\eta_{10}$ ,  $\eta_{50}$  e  $\eta_{100}$  representam as eficiências de conversão do inversor a 10%, 50% e 100% da potência nominal do inversor, respectivamente.

A potência de saída do gerador fotovoltaico  $P_{FV}$  é obtida multiplicando-se as perdas do seguidor do ponto de máxima potência,  $\eta_{SPMP}$ , pela potência máxima do gerador fotovoltaico,  $P_{mp}$ , de acordo com a relação a seguir:

$$P_{FV} = \eta_{SPMP} P_{mp} \quad (2.9)$$

O parâmetro  $p_{FV}$  representa o valor de saída de potência do gerador fotovoltaico normalizado em relação a potência nominal do inversor ( $P_{INV}^0$ ), conforme a seguir:

$$p_{FV} = \frac{P_{FV}}{P_{INV}^0} \quad (2.10)$$

onde  $P_{INV}^0$  é dado em [kW].

O parâmetro  $p_{saída,inv}$  representa a potência de saída do inversor normalizada pela potência nominal do mesmo, e seu valor pode ser obtido da seguinte maneira:

$$k_0 - p_{FV} + (1 + k_1)p_{saída,inv} + k_2 p_{saída,inv}^2 = 0 \quad (2.11)$$

sendo  $p_{saída,inv}$  adimensional.

A partir do valor obtido para  $p_{saída,inv}$ , calcula-se o valor da potência de saída do inversor conforme a equação a seguir:

$$P_{saída,inv} = p_{saída,inv} P_{INV}^0 \quad (2.12)$$

O valor de  $P_{saída,inv}$  é obtido em [kW].

A potência máxima de trabalho do inversor,  $P_{INV}^{max}$ , é definida como:

$$P_{INV}^{max} = 1,08 P_{INV}^0 \quad (2.13)$$

O valor obtido de  $P_{INV}^{max}$  é dado em [kW].

Finalmente, o valor da potência final é obtido através das condições a seguir:

$$P_{final,solar} = 0 \text{ se } P_{FV} \leq k_0 P_{INV}^0 \quad (2.14)$$

$$P_{final,solar} = p_{saída,inv} P_{INV}^0 \text{ se } k_0 P_{INV}^0 < P_{saída,inv} < P_{INV}^{max} \quad (2.15)$$

$$P_{final,solar} = P_{INV}^{max} \text{ se } P_{saída,inv} > P_{INV}^{max} \quad (2.16)$$

A dimensão de  $P_{final,solar}$  é [kW].

### 2.2.2 Influência do ângulo de azimute

A avaliação da influência do ângulo de inclinação e da orientação do arranjo fotovoltaico na produção anual de eletricidade foi objeto de estudo de Júnior *et al.*, 2016. Por intermédio de análises computacionais, os autores concluíram que as perdas são consideradas mínimas frente ao desempenho anual.

Foi realizada uma interpolação polinomial, a partir dos resultados para inclinação de 30°, para se obter uma equação que correlacionasse a redução de produção de energia elétrica e o ângulo de azimute. Foi obtida a seguinte equação:

$$y = 5 \cdot 10^{-15} \theta^6 - 6 \cdot 10^{-12} \theta^5 + 2 \cdot 10^{-9} \theta^4 - 3 \cdot 10^{-7} \theta^3 + 10^{-5} \theta^2 - 0,0004 \theta + 0,9708 \quad (2.17)$$

O fator de redução  $y$  é um valor adimensional que normaliza a energia gerada em função do ângulo de azimute. Portanto, para  $\theta = 0$ ,  $y = 1$ , pois não há perdas.

### 2.3 Sistema de cogeração

Segundo Oddone, 2001, cogeração é o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil, normalmente, energia mecânica e térmica. A energia mecânica pode ser utilizada no acionamento de equipamentos ou para geração de energia elétrica.

A geração de energia elétrica com a utilização de motogeradores e turbogeradores é utilizada nesse trabalho. Ambos os sistemas consistem em motores à combustão interna acoplados a um gerador síncrono dedicado à geração de energia elétrica.

A escolha do gás natural como combustível se deve à grande presença de tubulações de distribuição pela cidade e pela aplicação de tarifas especiais, no caso da cogeração.

### 2.3.1 Dimensionamento de um motor à combustão interna para ser utilizado na cogeração

As equações utilizadas para dimensionar a potência ideal de um motor à combustão interna foram extraídas de Moran e Shapiro, 2009. A partir da potência elétrica do gerador e do seu rendimento elétrico, é possível obter a taxa de transferência de calor resultante da combustão, conforme a equação a seguir:

$$Q_{comb} = \dot{m} PCI \quad (2.18)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica de combustível [kg/s] e PCI o poder calorífico inferior [kJ/kg].

A parcela convertida em eletricidade  $Pot_{elétrica,ideal}$  é dada por:

$$Pot_{elétrica,ideal} = \eta Q_{comb} \quad (2.19)$$

sendo  $\eta$  a eficiência de conversão elétrica, função da carga de operação. O restante da energia fornecida pelo combustível é tratada como sendo a taxa de calor rejeitada  $Q_{rej}$  para o ambiente, dada por:

$$Q_{rej} = (1 - \eta)Q_{comb} \quad (2.20)$$

O aproveitamento do calor rejeitado aumenta a eficiência global do processo. Contudo, nunca será possível aproveitar o calor rejeitado em sua totalidade, pois sempre haverá alguma ineficiência e/ou perda de calor. Desconsiderando essas demais perdas que podem ocorrer, os turbogeradores permitem a utilização na totalidade do calor rejeitado. Na utilização de motogeradores, essa quantidade de calor é rejeitada, em uma parcela nos gases de combustão com maior disponibilidade e, outra parcela, no circuito de arrefecimento (no radiador, por exemplo), que opera a uma temperatura mais baixa.

O calor rejeitado pode ser utilizado em um ciclo de refrigeração por absorção, obtendo como produtos finais água gelada ou ar resfriado. No caso de edifícios universitários, o ar resfriado pode ser utilizado no circuito de ar condicionado, diminuindo o consumo de energia elétrica.

## 3. Metodologia

Para analisar a implementação de geração distribuída, em um prédio, é necessário, primeiramente, dimensionar o sistema de geração de eletricidade. Após, é realizado o estudo da viabilidade financeira do sistema dimensionado, levando em conta a redução na fatura de luz, após implementação, a fatura remanescente, o custo para adquirir os equipamentos necessários e gastos com combustível, no caso de utilização de sistemas que utilizam motores à combustão interna. A ferramenta considera cinco casos de geração de energia elétrica, calculando a energia elétrica produzida ao longo de 20 anos, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno do investimento. Os casos são:

- Somente sistema solar fotovoltaico;
- Somente motor à combustão interna rotativo (turbogerador);
- Somente motor à combustão interna alternativo (motogerador);
- Sistema híbrido, composto por solar fotovoltaico e turbogerador;
- Sistema híbrido, composto por solar fotovoltaico e motogerador.

A partir dos dados de entrada (área do telhado do prédio, orientação azimutal e perfil de consumo) são feitos, concomitantemente, o dimensionamento e a análise da viabilidade

financeira da implementação para cada grupo gerador isoladamente: geração com utilização de sistema fotovoltaico, geração com turbogerador e geração com motogerador. A relação entre os sistemas propostos e os dados de entrada está demonstrada no fluxograma presente na Figura 2.2.

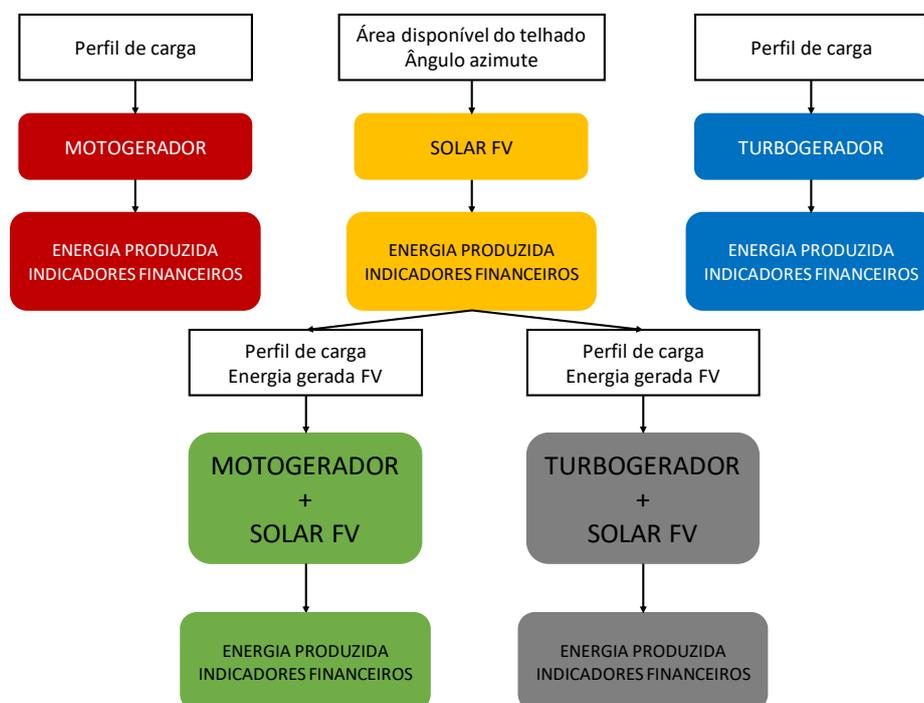


Figura 2.2. Fluxograma demonstrando a relação entre os dados de entrada utilizados para o dimensionamento de cada um dos cinco sistemas propostos.

A energia gerada pelo sistema fotovoltaico é dependente da área disponível e do ângulo de azimute. Portanto, não é obtida a partir do perfil de carga. Os sistemas de geração baseados em motor à combustão interna são dimensionados em função do perfil de carga (ou seja, do consumo total de energia). O dimensionamento dos sistemas híbridos é feito em função do resultado da geração de energia solar fotovoltaica. Para dimensionar o motor à combustão interna, no caso de um sistema híbrido, é abatida do consumo total de energia do prédio a quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

### 3.1 Geração de energia considerando implementação de um sistema solar fotovoltaico

A energia gerada é calculada em função da quantidade de painéis que cabem dentro da área especificada, da irradiância e temperatura locais. A área do telhado disponível é fornecida caso a caso (consistindo, portanto, em um dado de entrada), a disponibilidade solar e a temperatura são invariáveis, visto que se referem ao local de referência (considerando edificações situadas em Porto Alegre). O número máximo possível de painéis em uma superfície depende das dimensões fornecidas da mesma, das dimensões do painel e da sua inclinação. A distância entre uma linha de painéis e sua adjacente depende do sombreamento que uma realiza sob a outra. A distância mínima para evitar o sombreamento é calculada pela equação (2.1), na qual foi utilizado o valor de 0,98 m para largura do painel e 30° como ângulo de inclinação. A quantidade total é obtida, portanto, conforme o fluxograma da Fig. 3.1:

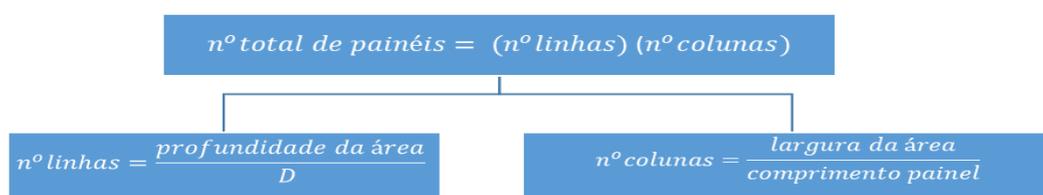


Figura 3.1 Fluxograma demonstrando a obtenção do número total de painéis que cabem em uma área determinada.

Após a determinação da quantidade de painéis, é necessário estimar o montante de energia gerada por esses sistemas ao longo de um ano. Na tabela 3.1 é descrita a sequência de etapas utilizada para calcular a energia elétrica gerada por um painel ao longo de um ano. Os dados para a irradiância no plano inclinado foram obtidos pelo *software* livre Radiasol 2. No site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, é possível obter dados de temperatura média para cada hora ao longo de um ano. Dessa forma, o sequenciamento descrito foi repetido para cada par irradiância e temperatura de um ano (8760 horas). Os valores para a TNOC e para o coeficiente de temperatura do ponto de máxima potência foram sugeridos por Zilles *et al*, 2012. Os valores para  $P_{INV}^0$ ,  $\eta_{10}$ ,  $\eta_{50}$ ,  $\eta_{100}$  foram retirados da folha de dados do inversor.

Tabela 3.1. Sequência de etapas para obtenção da potência gerada por um painel ao longo de um ano.

Etapa	Equação utilizada	Valores para as variáveis
1) Cálculo da temperatura da célula	Equação (2.3)	TNOC = 47°C; $T_a$ = dado horário (INMET); $H_{t,\beta}$ = dado horário (Radiasol 2);
2) Cálculo da potência $P_{mp}$	Equação (2.2)	$P_{FV}^0 = 320$ W; $\gamma_{mp} = -0,55\%/^{\circ}\text{C}$ ; $T_{c,ref} = 25^{\circ}\text{C}$ ; $H_{ref} = 1000$ W/m <sup>2</sup> ; $H_{t,\beta}$ = dado horário (INMET);
3) Cálculo do $\eta_{SPMP}$	Equações (2.4) e (2.5)	$P_{INV}^0 = 7000$ W; $\eta_{100} = 0,95$ ;
4) Cálculo dos fatores $k_0, k_1$ e $k_2$	Equações (2.6), (2.7) e (2.8)	$\eta_{10} = 0,95$ ; $\eta_{50} = 0,96$ ; $\eta_{100} = 0,93$ ;
5) Cálculo da potência de saída do gerador $P_{FV}$	Equação (2.9)	$P_{mp}$ obtido na etapa 2; $\eta_{SPMP}$ obtido na etapa 3;
6) Cálculo do parâmetro $P_{FV}$	Equação (2.10)	$P_{INV}^0 = 700$ W; $P_{FV}$ obtido na etapa 5;
7) Cálculo do parâmetro $P_{saída,inv}$	Equação (2.11)	$k_0, k_1$ e $k_2$ obtidos na etapa 4; $P_{FV}$ obtido na etapa 6;
8) Potência de saída do inversor $P_{saída,inv}$	Equação (2.12)	$P_{INV}^0 = 700$ W; $P_{saída,inv}$ obtido na etapa 7;
9) Cálculo da $P_{INV}^{max}$	Equação (2.13)	$P_{INV}^0 = 700$ W;
10) Obtenção da potência final $P_{final,solar}$	Equações (2.14), (2.15) e (2.16)	$k_0$ obtido na etapa 4; $P_{FV}$ obtido na etapa 5; $P_{INV}^{max}$ obtido na etapa 9;

Por meio das equações apresentadas na tabela 3.1 obtém-se a potência final para um painel. A potência total da planta fotovoltaica é obtida pela multiplicação da potência final pelo número de painéis.

O montante de energia gerada é obtido multiplicando a potência pelo período de geração de energia elétrica. Como os dados utilizados para irradiância e temperatura são médias horárias, o valor da energia é igual ao valor da potência. Por último, multiplica-se pelo fator de redução devido ao ângulo de azimute. No apêndice A é apresentado um fluxograma demonstrando a obtenção da energia elétrica gerada total pelo sistema solar fotovoltaico.

### 3.1.2 Análise financeira

A viabilidade de implementação do sistema solar fotovoltaico é feita pela análise financeira. No fluxo de caixa, foi considerado o custo de aquisição do sistema fotovoltaico, fatura remanescente após implementação e quantia economizada, devido à geração de energia elétrica. Para tanto, foram feitas algumas considerações:

- Custo de aquisição de R\$ 5,00 por Watt-pico a ser instalado;
- Redução de 0,5% na produção de energia elétrica a cada ano devido à degradação das células fotovoltaicas;
- Tarifas da concessionária CEEE para classe A4;
- Não há aumento no consumo de energia ao longo dos anos;
- As alíquotas de ICMS, PIS/COFINS utilizadas são a média dos últimos 12 meses (apresentadas no apêndice B);
- Período considerado de 20 anos.

A fim de possibilitar a simulação mensal da fatura de luz, a energia produzida durante um ano é dividida pelo número de meses, resultando, portanto, na energia média mensal produzida. Dessa forma, compara-se a fatura média mensal antes da implementação (dado de entrada) com a fatura utilizando a geração mensal média de energia, comparando, portanto, valores médios.

A compra dos equipamentos é considerada no ano 0.

Na simulação da fatura após a implementação do sistema solar fotovoltaico, não há alteração do consumo no horário de ponta (pois não há geração de energia nesse período) e nem na demanda contratada. É abatida a energia gerada pelo sistema fotovoltaico do consumo fora de ponta. A fatura remanescente é apresentada no apêndice C.

### 3.2 Geração de energia considerando implementação de um motor à combustão interna

Para o dimensionamento da energia produzida pelos sistemas à combustão, foram escolhidos o motor à combustão interna alternada da marca Cummins, modelo C12D6 e o motor à combustão interna rotativo da marca Capstone, modelo C65. As propriedades dos equipamentos foram retiradas dos seus respectivos catálogos e estão apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2. Dados técnicos dos motores à combustão interna escolhidos para análise.

Equipamento	$Pot_{elétrica,nominal}$	$\eta_{elétrico}$	$\eta_{térmico}$
Cummins C12D6	11 kW	33%	33%
Capstone C65	65 kW	27%	55%

As tarifas para o gás natural, assim como o valor de  $PCI_{comb}$ , foram retirados do site da distribuidora de gás natural Sulgás. As tarifas utilizadas foram as consideradas para cogeração. (Os valores utilizados estão apresentados no Anexo A).

A potência elétrica necessária para suprir todo o consumo é obtida de acordo com equação (3.1):

$$Pot_{elétrica,ideal} = \frac{\text{Consumo ponta} + \text{consumo fora de ponta}}{\text{número de horas em um mês}} \quad (3.1)$$

onde o valor de  $Pot_{elétrica,ideal}$  é obtido em [kW]; os consumos de energia elétrica são dados em [kWh].

A quantidade de geradores é obtida dividindo-se a  $Pot_{elétrica,ideal}$  pela potência nominal de cada gerador. A potência elétrica real é obtida pela multiplicação da quantidade de geradores pela sua potência nominal, conforme seguem as relações:

$$n^{\circ} \text{ de geradores} = \frac{Pot_{elétrica,ideal}}{Pot_{elétrica,nominal}} \quad (3.2)$$

$$Pot_{elétrica,real} = n^{\circ} \text{ de geradores} Pot_{elétrica,nominal} \quad (3.3)$$

onde o valor obtido para  $Pot_{elétrica,real}$  é dado em [kW].

O gasto com gás natural é obtido da seguinte forma:

$$Gasto_{gás \text{ natural}} = \dot{m}_{comb} \text{ tarifa} \quad (3.4)$$

onde o  $Gasto_{gás \text{ natural}}$  é obtido em reais [R\$] e a tarifa é dada por [R\$/m<sup>3</sup>].

O sequenciamento que permite obter a potência elétrica para os geradores e seus respectivos gastos foi organizado na tabela 3.3.

A sequência de etapas descrita na tabela 3.3 é repetida duas vezes. Uma vez utilizando os dados referentes ao motor à combustão interna alternativo e obtendo a potência elétrica necessária e suas despesas com gás natural. Em seguida, é repetida para a hipótese de implementação de geração distribuída, por intermédio de motor à combustão interna rotativo. O montante de energia gerada para cada caso é obtido multiplicando a potência pelo período de geração, no caso, todas as horas de um mês. Neste estudo, não foi levado em consideração os ganhos térmicos oriundos do sistema de recuperação considerado na cogeração.

Tabela 3.3 - Sequência de etapas utilizada para estimar a potência elétrica e as despesas com o consumo de gás natural, tanto para motor à combustão interna rotativo quanto para motor à combustão interna alternativo.

Etapa	Equação utilizada	Valores para as variáveis	
		motogerador	turbogerador
1) Cálculo do $Pot_{elétrica,ideal}$	Equação (3.1)	Consumo Ponta; Consumo Fora de Ponta.	Consumo Ponta; Consumo Fora de Ponta.
2) Número de motores à combustão interna	Equação (3.2)	$Pot_{elétrica,nominal} = 11kW$ ;	$Pot_{elétrica,nominal} = 65kW$ ;
3) Cálculo da $Pot_{elétrica,real}$	Equação (3.3)	Nº de motores à combustão interna obtido na etapa 2.	Nº de motores à combustão interna obtido na etapa 2.
4) Cálculo do $Q_{comb}$	Equação (2.19)	$Pot_{elétrica,real}$ obtido no passo 3; $\eta_{eletrico,motogerador}$ ;	$Pot_{elétrica,real}$ obtido no passo 3; $\eta_{eletrico,turbogerador}$ ;
5) Cálculo do $\dot{m}$	Equação (2.18)	$Q_{comb}$ obtido no passo 4; PCI = site Sulgás.	$Q_{comb}$ obtido no passo 4; PCI = site Sulgás.
6) Gastos com gás natural	Equação (3.4)	$\dot{m}$ obtido no passo 5; Tarifas gás natural = site Sulgás	$\dot{m}$ obtido no passo 5; Tarifas gás natural = site Sulgás

### 3.2.2 Análise financeira

A viabilidade de implementação de cada sistema gerador à combustão é feita por uma análise financeira. É simulado um fluxo de caixa simples, incluindo custo de compra do sistema, redução na fatura após implementação e fatura remanescente após implementação. A compra dos equipamentos é considerada no ano 0. Foram feitas as seguintes considerações:

- Custo de aquisição de R\$ 0,50 por Watt-pico instalado do motor à combustão interna alternativo;
- Custo de aquisição de R\$ 6,85 por Watt-pico instalado do motor à combustão interna rotativo;
- Tarifas da concessionária CEEE para classe A4;
- Não há aumento no consumo de energia ao longo dos anos;
- As alíquotas de ICMS, PIS/COFINS utilizadas são a média dos últimos 12 meses;
- Não foi considerada a redução de consumo de energia devido à cogeração;
- Período considerado: 20 anos.

O consumo no horário de ponta é totalmente abatido. Haverá consumo remanescente no horário fora de ponta. No apêndice D é apresentada uma tabela que descreve detalhadamente a obtenção dos consumos remanescentes.

### 3.3 Geração de energia considerando implementação de um sistema híbrido solar fotovoltaico e motor à combustão interna

A geração de energia através de sistemas híbridos, compostos por sistema solar fotovoltaico e motor à combustão interna alternativo ou motor à combustão interna rotativo foi considerada. O dimensionamento do sistema híbrido não pode ser feito em paralelo aos demais, pois é dependente do montante de energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos.

Após realização da metodologia proposta no item 3.1 deste trabalho, o dimensionamento do sistema de geração híbrido deve levar em fatura a energia oriunda dos sistemas solares. Para tanto, os motores à combustão interna foram dimensionados de acordo com a seguinte equação, que é uma variação da equação (3.1):

$$Pot_{elétrica,ideal} = \frac{\text{Consumo ponta} + \text{consumo fora de ponta} - \text{geração energia solar}}{\text{número de horas em um mês}} \quad (3.5)$$

onde *geração energia solar* é a energia elétrica gerada pelo sistema solar fotovoltaico, já obtido, em [kWh].

A determinação da quantidade de motores à combustão interna, da energia elétrica gerada e dos gastos com aquisição de gás natural são feitos conforme explicitado no item 3.2 deste trabalho.

### 3.3.1 Análise financeira

A análise financeira do sistema híbrido foi feita através de um fluxo de caixa simples. Todas as considerações feitas nos itens 3.1.2 e 3.2.2 são mantidas. Na simulação da fatura após a implementação, o consumo no horário de ponta é totalmente abatido. Haverá consumo remanescente no horário fora de ponta. No apêndice E é apresentada uma tabela que descreve detalhadamente a obtenção dos consumos remanescentes.

## 4. Aplicação da metodologia em um estudo de caso e discussão dos resultados

A metodologia foi aplicada em um estudo de caso. Foram utilizados valores arbitrários de 40 por 30 metros para a área de telhado disponível para implementação de sistema solar fotovoltaico, valores razoáveis para o caso de um prédio universitário. O ângulo de azimute foi considerado igual a zero. O perfil de consumo (média mensal de consumo) foi calculado a partir de faturas anuais disponíveis na internet de uma universidade. Foram utilizadas as tarifas de consumo e demanda de energia da rede elétrica aplicadas pela CEEE aos consumidores da classe A4, na qual se encontram os prédios universitários de Porto Alegre. Assim, foi possível testar a ferramenta utilizando o perfil de consumo real de um prédio universitário.

O perfil de carga e as tarifas utilizadas são apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2. As alíquotas de ICMS, PIS e COFINS utilizadas são a média dos últimos 12 meses e estão no apêndice B.

Tabela 4.1 - Consumo no horário de ponta, consumo no horário fora de ponta e demanda utilizados na situação proposta.

Demanda [kW]	Consumo Ponta [kWh]	Consumo fora de ponta [kWh]
930	23360	228464

Tabela 4.2 – Tarifas aplicadas ao Consumo no horário de ponta, consumo no horário fora de ponta e demanda utilizados na situação proposta.

Demanda [R\$/kW]	Consumo Ponta [R\$/kWh]	Consumo fora de ponta [R\$/kWh]
20,21	0,45683	0,31111

O consumo de energia elétrica da edificação ao longo de 20 anos é de 61 MWh. A energia elétrica gerada ao longo de 20 anos e o custo de implementação para os cinco sistemas de geração propostos foram plotados em um gráfico, que é mostrado na figura 4.1

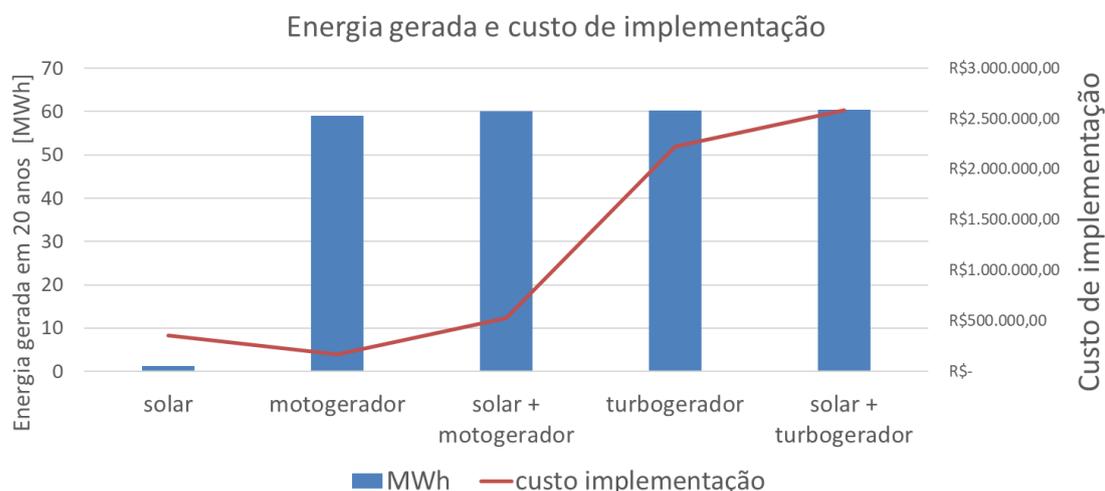


Figura 4.1. Energia elétrica gerada ao longo de 20 anos e custo de implementação para os cinco sistemas de geração propostos.

O percentual de energia produzida através de sistema solar fotovoltaico em relação à energia consumida é de apenas 2,2%. Sendo pequena a redução da fatura de energia ao implementar somente o sistema de geração fotovoltaica, o alto custo do investimento inicial não é abatido ao longo dos anos, inviabilizando o projeto. Contudo, esse comportamento já era esperado, pois prédios universitários possuem alta relação de consumo de energia por m<sup>2</sup>, enquanto a energia solar fotovoltaica possui baixa relação de produção de energia por área.

Todos os demais sistemas de geração são capazes de suprir praticamente todo o consumo de energia elétrica. Porém, somente na implementação do motogerador e do sistema híbrido baseado no motogerador e sistema solar fotovoltaico, houve retorno financeiro. No primeiro caso, o tempo de retorno do investimento inicial foi estimado em 3 anos e foi obtida uma taxa interna de retorno de 62%. Ao implementar o sistema híbrido, o investimento inicial foi recuperado em 5 anos, possuindo uma TIR igual a 29%. Nos demais casos, como não houve retorno do investimento inicial, não foi obtido nenhum valor para a TIR.

A implementação do motor à combustão interna rotativo, isoladamente, não se mostrou viável. Embora produza praticamente toda energia necessária, o alto custo do equipamento inviabiliza a geração distribuída. Por consequência, o sistema híbrido consistindo de turbogerador e sistema solar fotovoltaico não foi viável.

## 5. Conclusão

Neste trabalho, foi proposta uma ferramenta para analisar a viabilidade da aplicação de geração distribuída, analisando o perfil de carga, área disponível e orientação azimutal em prédios universitários. Para isso, foi criada uma metodologia para estimar a produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos, motor à combustão interna alternativo, motor à combustão interna rotativo, sistema híbrido compostos por sistemas fotovoltaicos e motor à combustão interna alternativo, sistema híbrido compostos por sistemas fotovoltaicos e motor à combustão interna rotativo e, por fim, analisar suas respectivas viabilidades financeiras.

Foi proposto um cenário para avaliar o comportamento da ferramenta. A implementação de sistema solar fotovoltaico não se mostrou viável devido ao alto custo de implementação e à pequena geração de energia elétrica frente ao consumo total. Os demais sistemas de geração são capazes de gerar praticamente toda energia consumida. Contudo, somente no caso em que foi considerada a geração de energia, através do motogerador e do sistema híbrido

composto por energia solar fotovoltaica e pelo motogerador, houve retorno financeiro. Isso se deve ao fato de o motogerador possuir um custo de implementação muito menor comparado ao turbogerador.

A justificativa do estudo se mostra pertinente frente aos resultados ao analisar a sensibilidade da ferramenta, de acordo com as diferentes formas de geração de energia elétrica, das tarifas para energia elétrica utilizadas e dos valores propostos na implementação de cada sistema gerador. Dessa forma, diante dos frequentes aumentos das tarifas e redução no custo dos equipamentos, a implementação de projetos de geração distribuída tende a se tornar mais viável

A ferramenta cumpre com a sua proposta de analisar a viabilidade de implementação de geração distribuída a partir dos dados de entrada.

## 6. Trabalhos Futuros

Um tópico importante para trabalhos futuros é incluir, nos cálculos, a utilização da energia térmica disponível nos gases de saída da combustão, em um ciclo de refrigeração por absorção. Igualmente, é importante considerar a variação do valor do dinheiro ao longo do tempo.

### Referências bibliográficas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; “**Resolução Normativa N°687/2015**”. Brasil, 2015.

Balestieri, J. A. P. “**Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**”. Florianópolis: Editora da UFSC, 2002.

Basrawi, Firdaus, Takanobu Yamada, e Shin'ya Obara. 2014. “**Economic and Environmental Based Operation Strategies of a Hybrid Photovoltaic–microgas Turbine Trigeneration System**”. Applied Energy 121 (maio): 174–83.

Cascaes, B.P. [2016]. “ **Avaliação do potencial de utilização de SFCR em uma universidade no sul do país**”, 22.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica, “Tarifas e Custos” [http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Tarifas\\_A-2017-12\\_85226.pdf](http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Tarifas_A-2017-12_85226.pdf) Acesso em: 23/05/2018

Chua, K.J., W.M. Yang, T.Z. Wong, e C.A. Ho. 2012. “**Integrating Renewable Energy Technologies to Support Building Trigeneration – A Multi-Criteria Analysis**”. Renewable Energy 41 (maio): 358–67.

Comodi, G., Renzi, M., Cioccolanti, L., Caresana, F., Pelagalli, L. 2015. “**Hybrid System with Micro Gas Turbine and PV (Photovoltaic) Plant: Guidelines for Sizing and Management Strategies**”. Energy 89 (setembro): 226–35. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.072>.

Consumo de energia elétrica no Ibilce, na UNESP. 2018. Disponível em [www.ibilce.unesp.br/#!/cice/consumo-de-energia-eletrica-no-ibilce](http://www.ibilce.unesp.br/#!/cice/consumo-de-energia-eletrica-no-ibilce). Acesso em: 24/06/2018

CRESESB, 2014. “**Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**”.

Júnior, A. M., Santana, K.G.S., Macedo, A.C., Nascimento, O.C.S., Silva S.B. [2017.]. **“Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes ângulos de inclinação e azimute localizados em Palmas-to.”**, 5.

Moran, M. J.; Shapiro, H. N. **“Princípios de termodinâmica para engenharia”**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

Oddone, D. C. **“Cogeração. uma alternativa para produção de eletricidade”**. São Paulo. IEE/USP, 2001.

Ozturk, M., Dincer, I. 2013. **“Thermodynamic Assessment of an Integrated Solar Power Tower and Coal Gasification System for Multi-Generation Purposes”**. Energy Conversion and Management 76 (dezembro): 1061–72.

Ribeiro, A. S.; Silveira, P. N. **“Proposta de sistema de cogeração para uma edificação nZEB da Universidade de Brasília”**. 2016. 119.

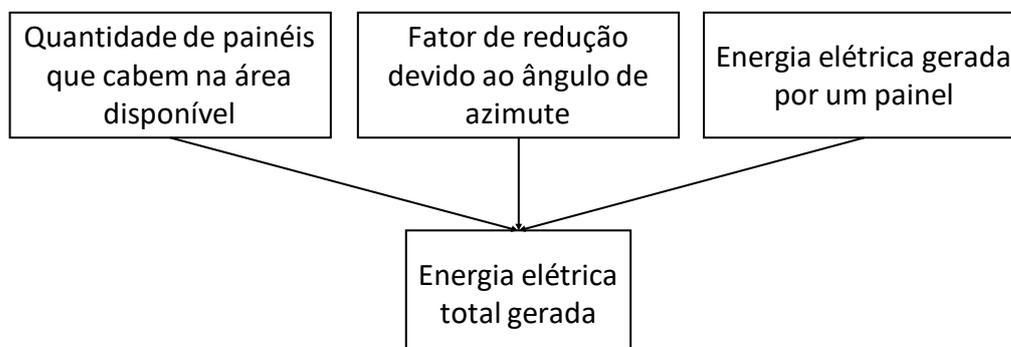
Sonar, Deepesh, S.L. Soni, e Dilip Sharma. 2014. **“Micro-Trigeneration for Energy Sustainability: Technologies, Tools and Trends”**. Applied Thermal Engineering 71 (2): 790–96.

Sulgás – “Tabela de preços”. <http://www.sulgas.rs.gov.br/sulgas/industrial/tabela-de-precos>  
Acesso em 30/05/2018.

Urbanetz, J. J. **“Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas : sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade”** - Florianópolis, SC, 2010.

Zilles, R.; Macedo, W. N.; Galhardo, M. A. B.; Oliveira, S. H. F., **“Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica”**. 2012. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos. 208

APÊNDICE A – Fluxograma demonstrando a obtenção da energia elétrica total gerada pelos sistemas fotovoltaicos



APÊNDICE B – Média das alíquotas de ICMS, PIS e COFINS para os últimos 12 meses

PIS [%]	COFINS [%]	ICMS [%]
0,729	3,111	30,00

APÊNDICE C – Consumos remanescentes após implementação de sistema solar fotovoltaico

Consumo Ponta	Inalterado.
Consumo Fora de ponta	$\text{Consumo } FP_{inicial} - \text{energia}_{gerada,solar}$
Demanda	Inalterada

APÊNDICE D – Consumos remanescentes após implementação de sistema de geração utilizando motor à combustão interna

Consumo Ponta	= 0 (abatido).
Consumo Fora de ponta	$\text{Consumo } FP_{inicial} - \text{energia}_{gerada,motor} - \text{Consumo } P_{inicial}$
Demanda	Inalterada

APÊNDICE E – Consumos remanescentes após implementação de sistema híbrido de geração utilizando motor à combustão interna e sistema solar fotovoltaico

Consumo Ponta	= 0 (abatido).
Consumo Fora de ponta	$= \text{Consumo } FP_{inicial} - \text{energia}_{gerada,motor} - \text{energia}_{gerada,solar} - \text{Consumo } P_{inicial}$
Demanda	Inalterada

ANEXO A – Tarifas aplicadas pela Sulgás e dados técnicos sobre o gás natural

Tarifas Sulgás		
Volume consumido (m <sup>3</sup> /dia)	Parcela fixa (R\$/m <sup>3</sup> )	Parcela variável(R\$/m <sup>3</sup> )
0 a 8	250	0
9 a 16.000	0	1,1111
Acima de 16.000	13008	1,084

PCI<sub>gás natural</sub> = 62368 kJ/kg;