



Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos: um caso de estudo do Smart Campus Facens, SP, Brasil

The influence of meteorological parameters in the generation of energy in photovoltaic panels: a case study of Smart Campus Facens, SP, Brazil

Ana Carolina Camargo Francisco^[a] , Henrique Ewbank de Miranda Vieira^[a] ,
Regiane Relva Romano^[a] , Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda^[b] 

^[a] Centro Universitário Facens, Sorocaba, SP, Brasil

^[b] Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, SP, Brasil

Como citar: Francisco, A. C. C., Vieira, H. E. M., Romano, R. R., & Roveda, S. R. M. M. (2019). Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos: um caso de estudo do smart campus Facens, SP, Brasil. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 11, e20190027. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190027>

Resumo

O conceito de cidades inteligentes, apesar de não possuir uma definição universalmente aceita, está cada vez mais sendo discutido. Com o aumento significativo da porcentagem da população que vive em cidades e o conseqüente aumento do uso dos recursos, novos modelos de cidades são desenhados para que tal crescimento possa ser sustentável. A energia é um dos principais recursos necessários para o homem, e novas formas de geração de energia devem ser consideradas. Devido às condições geográficas brasileiras, o uso da energia fotovoltaica aparenta ser uma excelente opção, porém hoje corresponde a aproximadamente 2% da energia total brasileira. Este trabalho buscou relacionar de que forma as condições meteorológicas influenciam na geração de energia de painéis fotovoltaicos, de modo a permitir a criação de ferramentas que identifiquem regiões com alto potencial de geração de energia fotovoltaica. As variáveis meteorológicas foram consideradas como variáveis independentes do modelo proposto, que buscava explicar a variável dependente Energia. Os resultados demonstraram uma potencial geração de energia solar fotovoltaica em diversos locais no Brasil, já que a incidência de radiação solar foi identificada como a variável que mais explica a energia gerada, e o país possui altas taxas desta variável em toda sua extensão.

Palavras-chave: Cidade inteligente. Sustentabilidade. Energia fotovoltaica.

Abstract

Although it does not have a universally accepted definition, the concept of smart cities is increasingly being discussed. With the significant increase in the percentage of the population living in cities and the consequent increase in the use of resources, new city models are designed so such growth can be sustainable. Energy is one of the key resources needed by man, and new forms of energy generation must

ACCF é mestre em Matemática Aplicada, licenciada em Matemática, e-mail: ana.camargo@facens.br

HEMV é doutor em Administração, bacharel em Engenharia de Produção, e-mail: henrique.vieira@facens.br

RRR é doutora em Administração de Empresas, mestre em Informática - Gerenciamento de Sistemas de Informação, tecnóloga em Processamento de Dados, e-mail: regiane.relva@facens.br

SRMMR é doutora em Matemática, mestre em Matemática e licenciada em Matemática, e-mail: sandra.regina@unesp.br

be considered. Due to the Brazilian geographic conditions, the use of photovoltaic energy seems to be an excellent option, but today it corresponds to approximately 2% of the total Brazilian energy. This work aimed to relate how the meteorological conditions influence the energy generation of photovoltaic panels to allow the creation of tools that identify regions with high potential of photovoltaic energy generation. The meteorological variables were considered as independent variables of the proposed model, which sought to explain the dependent variable Energy. The results demonstrated a potential generation of photovoltaic solar energy in several places in Brazil since the incidence of solar radiation was identified as the variable that most explains the energy generated and the country has high rates of this variable in all its extension.

Keywords: Smart city. Sustainability. Photovoltaic energy.

Introdução

Estima-se que até o ano de 2050 a população que vive em cidades exceda 80% do total da população, sendo responsável pelo consumo de mais de 70% dos recursos do planeta (Bent et al., 2017). Preocupados com o futuro do nosso planeta, líderes mundiais adotaram o documento “Transformando o Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, lançado pela Organização das Nações Unidas (ONU) (ONU, 2015), no qual acordaram 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS).

Para que os objetivos da Agenda 30 sejam alcançados, é necessária uma reestruturação na forma como as cidades são organizadas, uma vez que o aumento desenfreado de todos os recursos é insustentável. O conceito de cidade inteligente nasceu dessa necessidade de reestruturação e não possui uma única definição (Bent et al., 2017).

Muitos autores já discutiram o tema sob diversos pontos de vista, e em diversas das definições o conceito de sustentabilidade é mencionado. As cidades têm um papel fundamental quanto à contribuição com a sustentabilidade, não sendo apenas sistemas econômicos (Rosales, 2017). Segundo Borsekova et al. (2018), tanto cidades inteligentes de médio porte como as cidades inteligentes grandes têm ganhos ecológicos, apesar de que as de médio porte costumam ter melhores condições ambientais e de vida. Os autores veem como justificativa o fato de que em cidades inteligentes os planejadores urbanos, assim como seus habitantes, dão maior importância ao ambiente em que vivem.

O Brasil está entre os países que se comprometeram com essa ideia (Weiss et al., 2015), tendo inclusive publicado a norma ABNT NBR ISO 37120:2017, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que traz um conjunto de indicadores que objetivam medir o desempenho de serviços urbanos e qualidade de vida (ABNT, 2017).

Dentre os assuntos abordados, a preocupação com o uso da energia não é um assunto novo e vai ao encontro de vários dos objetivos da Agenda 30, como a erradicação da pobreza, energia acessível e limpa e o combate às alterações climáticas.

Sabe-se da importância de se investir em fontes alternativas de geração de energia, e a energia fotovoltaica é uma delas. O uso desse tipo de energia, assim como estudos sobre sua implementação, tem crescido nos últimos anos em diversos países, e isto se deve, em parte, à diminuição de custos na produção de painéis fotovoltaicos e subsídios governamentais em algumas regiões, principalmente na Europa. No Brasil, porém, o investimento ainda é alto e o retorno não é imediato (Holdermann et al., 2014; Dias et al., 2017; Viana et al., 2011; Orioli & Di Gangi, 2014; Martins & Pereira, 2011; Ferreira et al., 2018; Stilpen & Cheng, 2015; Didoné et al., 2017).

Giffinger et al. (2007) propuseram 6 características para definir “*smart cities*”, que são: *smart economy, smart people, smart governance, smart mobility, smart environment* e *smart living*. Tais características possuem fatores indicativos do conceito de cidades inteligentes.

Os principais fatores considerados em *smart environment*, relatados pelos autores, são: atratividade das condições naturais, poluição, proteção ambiental e gestão de recursos sustentável. Sendo assim, a

preocupação com formas sustentáveis de geração de energia é assunto intrínseco quando se pensa em cidades inteligentes.

Este trabalho se propõe a discutir a geração de energia através do uso de painéis fotovoltaicos. Ele foi realizado num protótipo de cidade inteligente situado dentro do Centro Universitário UniFacens – Facens.

O objetivo foi estudar de que forma parâmetros meteorológicos como temperatura, umidade, radiação e velocidade do vento influenciam na geração de energia de painéis fotovoltaicos e, dessa forma, argumentar sobre sua viabilidade de implementação em diferentes regiões do país. Tal estudo baseou-se em dados provenientes de uma estação meteorológica e dos painéis fotovoltaicos, todos localizados no Centro Universitário UniFacens – Facens.

Revisão da literatura

Nos últimos anos, tem aumentado a preocupação com a questão da sustentabilidade em todo o Brasil. Marques et al. (2018) notaram que a energia é um dos temas mais abordados nessa área, juntamente com a água e a mobilidade urbana. Tal estudo classificou políticas públicas em prol da sustentabilidade e usou a instalação de painéis fotovoltaicos como um dos fatores de classificação.

O acesso à energia é um pré-requisito para a vida moderna e fundamental para erradicação da pobreza em todo o planeta. O recente avanço da tecnologia de informação afetou significativamente todos os aspectos da vida humana. Como praticamente tudo o que envolve tecnologia necessita de eletricidade, o aumento de sua demanda tem sido alto. O uso residencial de energia tem acompanhado esse aumento de demanda, sendo um motivo o crescimento do uso de condicionadores de ar (Stensjö et al., 2017).

Mesmo com o aumento de demanda de energia elétrica residencial, ainda existem muitas pessoas sem acesso a serviços modernos de energia, sendo esta também uma razão para estudo e investimento em fontes alternativas deste recurso.

Mais de 60% da energia produzida no Brasil vem de hidroelétricas, conforme podemos ver na Figura 1 (Brasil, 2018). Além dos impactos ambientais gerados por esse tipo de energia, como alagamento, alteração do ciclo hidrológico e desequilíbrio ecossistêmico local, também há impacto social, como reassentamento da população onde se instala, ribeirinhos e indígenas. Segundo Pereira et al. (2017), “investimentos em grandes hidroelétricas intensificam a vulnerabilidade da matriz elétrica brasileira ao regime de chuvas, com forte influência na segurança energética do país”. O autor também afirma que tem caído a capacidade de geração de energia por este meio, ficando o país assim suscetível a apagões.

Além disso, devido à extensão territorial do país e à predominância de geração de energia por hidroelétricas, os grandes centros de consumo de energia são geralmente muito distantes das plantas energéticas, necessitando de linhas de transmissão muito extensas, ocasionando muita perda de energia (Dias et al., 2017). Também agravam a situação períodos de escassez de água, tendo sido a causa de racionamento de energia em 2001 e aumento dos preços em 2015.

A energia solar é a fonte mais abundante de energia. Estudos mostram que se apenas 0,1% da energia solar incidente sobre a Terra pudesse ser convertida com eficiência de 10%, isso seria 4 vezes maior que a capacidade de geração de energia mundial, que em 2013 era de aproximadamente 5000GW (Clerici & Assayag, 2013). Tal energia pode ser usada para aquecer líquidos ou transformada em eletricidade através do uso de painéis fotovoltaicos.

Dentre as vantagens do uso desse tipo de energia, além de sua abundância, podemos citar sua instalação rápida, excelente solução para áreas remotas, alta confiabilidade e duração. E suas desvantagens são alto custo, principalmente devido ao custo dos painéis fotovoltaicos e inversores de energia, intermitência, baixa eficiência em algumas regiões do planeta por causa da baixa irradiação solar e possíveis impactos ambientais relacionados a aves (Tsoutsos et al., 2005). Ainda assim, as vantagens são maiores que as desvantagens.

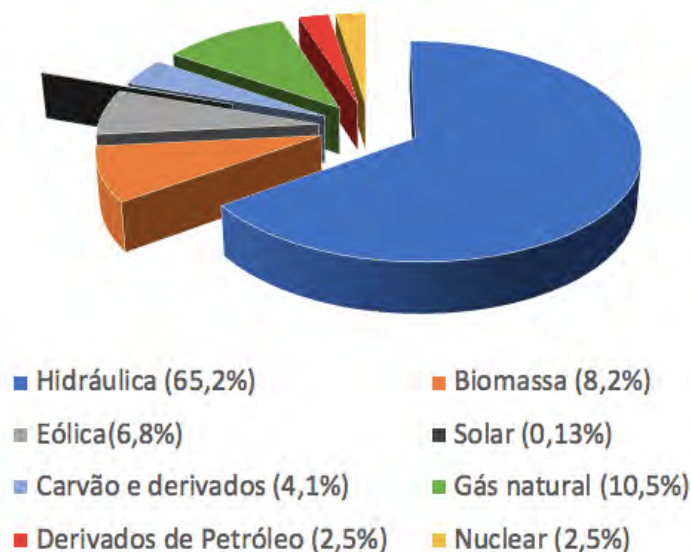


Figura 1 - Matriz elétrica brasileira 2018, ano base 2017. Fonte: Brasil (2018).

O Brasil tem potencial para uso de energia solar muito maior que a maioria dos países europeus, sendo inclusive maior que a Alemanha, conforme se observa nas Figuras 2 e 3, sendo este último o país que mais investe nesse tipo de energia (Pereira et al., 2017; Ferreira et al., 2018). Vale ressaltar que as imagens apresentadas nas Figuras 2 e 3 possuem escalas distintas de cores.

A radiação solar varia de acordo com a estação do ano e a região, sendo de 1500 a 2300kWh/m²/ano, enquanto na Alemanha é de 900 a 1250kWh/m²/ano. Sua extensa localização entre os trópicos de Câncer e Capricórnio faz com que receba altas taxas de radiação, quase que perpendiculares, aumentando assim seu potencial de geração de energia fotovoltaica.

Porém, o custo de implantação, apesar de estar diminuindo nos últimos anos, ainda é um fator impeditivo (Pereira et al., 2013; Dias et al., 2017), além da ausência de políticas incentivadoras para projetos de pequeno porte como residências ou empresas pequenas.

Segundo Dias et al. (2017), a energia fotovoltaica tem recebido mais atenção do governo recentemente. Já existe regulamentação para plantas de microgeração e minigeração de energia produzidas a partir de fontes renováveis, e o Banco Nacional de Desenvolvimento Social e Econômico (BNDES) possui opções atrativas de financiamento para a instalação desse tipo de energia, porém apenas para grandes empresas (Silva, 2015). Os autores também ressaltam que alguns fatores impeditivos estão sendo removidos a partir de mudanças na legislação brasileira, como redução de impostos para empresas de sistemas de transmissão e distribuição desse tipo de energia e remoção de impostos federais e estaduais incidentes sobre a energia gerada pelo consumidor e entregue à concessionária. Há ainda projetos sendo discutidos no Congresso brasileiro que pretendem viabilizar economicamente a geração de energia solar fotovoltaica, como o projeto 10370/2018, que faz parte da Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica (PRONASOLAR), e propõe que, por um período de 10 anos, contribuintes possam deduzir da base de cálculo do Imposto de Renda devido 25% do custo para implementação de um sistema solar fotovoltaico com potência de até 5000kW, e pretende viabilizar a instalação de 5 milhões de sistemas até 2030.

De acordo com a regulamentação atual, consumidores que investem em microgeração de energia fotovoltaica podem injetar energia na rede da concessionária local por meio de empréstimo gratuito, em troca de créditos que possuem validade de 36 meses (Rodrigues et al., 2016). Assim, enquanto há produção de energia durante o dia, o excesso é cedido pelo consumidor à distribuidora e pode ser trocado em um sistema de compensação de créditos para a própria unidade consumidora onde a energia é gerada, ou para qualquer estabelecimento onde seu cadastro de pessoa física seja registrado (ANEEL, 2012).

Lacchini & Rùther (2015) afirmam que no Brasil o retorno do investimento em energia fotovoltaica para uma família de 6 pessoas, numa casa de 200m², térrea, com ar-condicionado mantendo à temperatura de 22°C a 24°C, varia de 9 a 16 anos, dependendo da região onde o sistema é instalado.

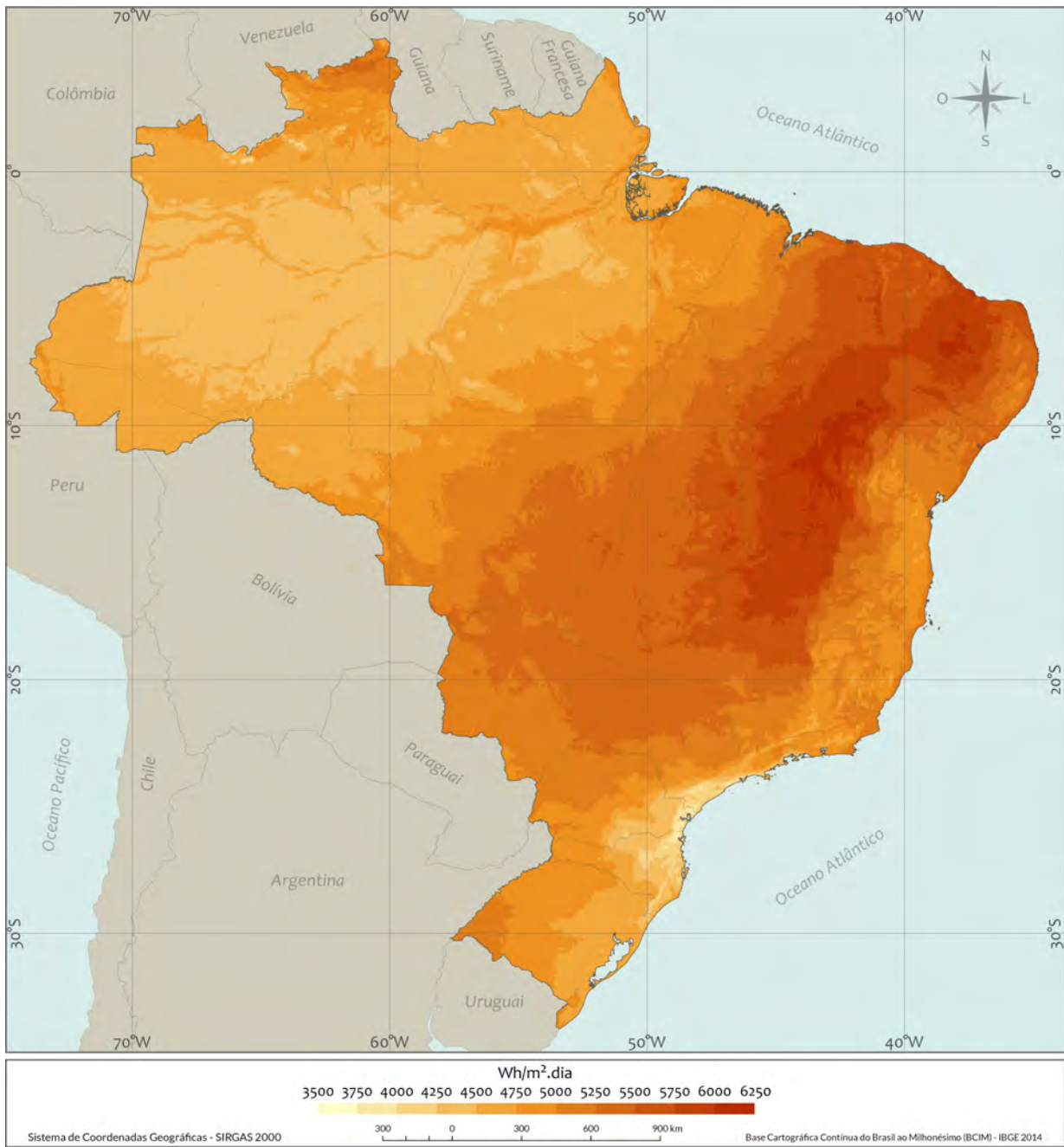


Figura 2 - Média anual do total diário da irradiação no plano inclinado na latitude no Brasil.
Fonte: Pereira et al. (2017).

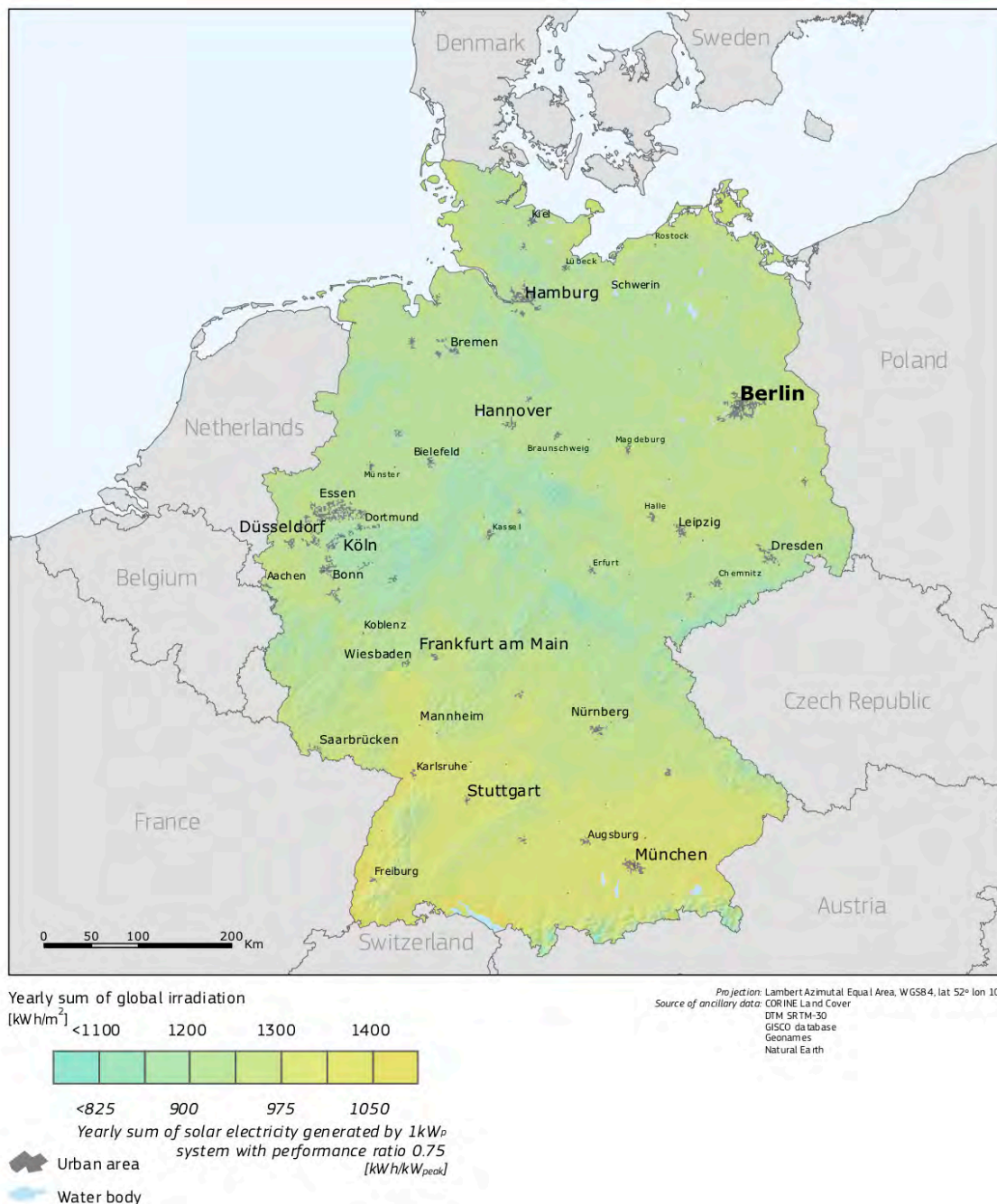


Figura 3 – Irradiação no plano inclinado e potencial elétrico solar na Alemanha.

Fonte: (Huld & Pinedo-Pascua, 2017).

Considerando-se a importância de se discutir, entender e desenvolver conceitos relacionados a cidades inteligentes, os ambientes de aprendizagem, principalmente faculdades e universidades, têm cada vez mais se autointitulado “*smart*”, tornando-se protótipos de cidades inteligentes, criando e implementando soluções de caráter tecnológico e/ou sustentável. Em geral, os investimentos estão associados principalmente à infraestrutura, mas em alguns contextos relaciona-se à estrutura das metodologias de ensino, *softwares* que são aplicados e características das avaliações. Assim como o caso de cidades inteligentes, ainda não há um consenso no significado do adjetivo *smart* em ambientes educacionais (Bandara et al., 2016; Hwang, 2014; Sastra & Wiharta, 2017).

Vale ressaltar a importância desse tipo de instituição, uma vez que possuem forte poder de influência, podendo formar cidadãos conscientes e preparados para atuarem de forma colaborativa com o assunto.

Apesar de não se saber ao certo quantificar o poder e as consequências de tal influência, essa abordagem alinha-se com a tendência de estruturação de cidades no futuro, seja tecnológica, de sustentabilidade ambiental ou ambas as abordagens consideradas. Diversos pesquisadores têm discutido sobre o tema, inclusive com tentativas de medir o quão “smart” tais ambientes vêm a ser (Galego et al., 2016; Giovanella et al., 2015).

O Centro Universitário Facens, situado no interior do estado de São Paulo, Brasil, é referência no estudo e desenvolvimento de projetos relacionados a cidades inteligentes, sendo inclusive ganhador de diversos prêmios pelo seu Programa denominado Smart Campus, criado em parceria com o G-Lab, do MIT, em 2014. Dentre os prêmios, podemos citar Top Educacional 2016 – ABMES, Automação Educacional GS1/2016, Smart City UK London/2017, Best IoT Implementation Berlim/2018, Prêmio/Certificado: Programa Benchmarking Sustentabilidade/2018 e Melhor da Academia/2018. O programa foi selecionado pela empresa Qualcomm para receber o primeiro “IoT Reference Center” da América Latina, objetivando desenvolver soluções inovadoras e disruptivas de IoT para a área de Cidades Inteligentes (Perin, 2017; Smart-Campus, 2018).

O Smart Campus Facens é provedor de projetos que objetivam tornar as cidades mais humanas, inteligentes e sustentáveis. Em seu campus são desenvolvidos, testados e implementados diversos projetos, e a faculdade atua como um protótipo de cidade inteligente (Glaeser & Berry, 2006).

Alunos e professores podem atuar em um ou mais dos 8 eixos do projeto, que são: Educação e Cultura, Energia, Saúde e Qualidade de Vida, Indústria e Negócios, Meio Ambiente, Mobilidade e Segurança, Tecnologia da Informação e Comunicação, Urbanização e o núcleo de Governança que faz a gestão de todos os projetos. Seus projetos vão ao encontro dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), estando dentre eles o Projeto do Sistema Solar Fotovoltaico, ilustrado na Figura 4.



Figura 4 - Projeto Sistema Solar Fotovoltaico Centro Universitário Facens. Fonte: Próprio autor.

Um dos projetos do Smart Campus Facens foi a constituição da CICE (Comissão Interna de Conservação de Energia), formada por alunos e professores para a realização de trabalhos voltados para a conscientização energética e ambiental, monitoramento do consumo de energia e desenvolvimento de projetos de infraestrutura que promovam a eficiência energética no campus da faculdade. O trabalho

mais relevante deste projeto foi a instalação de painéis fotovoltaicos responsáveis atualmente pela geração de mais de 15% da energia consumida para a manutenção do campus.

Foram utilizados dados diários da estação meteorológica e dos 4 inversores de energia conectados aos painéis fotovoltaicos, todos instalados na Facens. Os inversores tinham capacidade de 12,5kW, 15kW, 17,5kW e 20kW, contendo 42, 63, 63 e 84 módulos de 245Wp, respectivamente.

Foram considerados os dados do período de março de 2017 a setembro de 2018. Os dados provenientes da estação meteorológica foram medidos a cada 10 minutos, e os dos inversores a cada 4 segundos. Para análise deste trabalho, os dados foram considerados por dia.

Para os dados meteorológicos, foram tomadas as médias diárias dos registros de radiação média, velocidade do vento média e umidade média. Para os dados de temperatura, foram considerados os valores máximos diários das temperaturas médias. A escolha procurou descartar a variação de temperatura noturna, período no qual não há geração de energia fotovoltaica e, portanto, foge do interesse deste estudo.

Com relação aos dados dos inversores, foi feita a diferença entre a energia total acumulada registrada em cada inversor por dia, para se obter a energia gerada no dia correspondente. Como cada inversor estava relacionado a um número diferente de módulos, os dados de cada inversor foram divididos pelos respectivos números de módulos a eles conectados, sendo assim considerada a energia gerada por módulo.

Inicialmente foi realizada uma inspeção visual das relações entre as variáveis e estudada a correlação entre todas elas, conforme apresentado na Figura 5. Na sequência, foram estudados modelos que descrevessem a variável Energia, iniciando-se com regressão linear simples com a variável que apresentou maior correlação e, na sequência, foram estudadas regressões múltiplas, verificando-se se havia melhora do modelo inicial com o acréscimo de mais variáveis explicativas, por meio do método *stepwise forward* (Kleiber & Zeileis, 2008).

Em seguida, utilizando o modelo linear encontrado, procedeu-se com um *bootstrap* para 10.000 repetições. A cada repetição foram sorteados 30 dados de cada inversor, obtendo-se assim uma amostra total de 120 dados. Para reduzir o efeito de somente um local amostrado, o procedimento foi repetido 10.000 vezes, sendo considerada a porcentagem de dados onde as variáveis independentes tiveram significância no modelo de regressão múltipla, para então concluir qual modelo melhor explicava a variável Energia. A análise dos dados foi feita através do software livre R[®] (R Core Team, 2010).

Resultados e análises

As séries de dados Energia, Temperatura, Radiação, Umidade e Velocidade do vento são apresentadas na Tabela 1. Verifica-se que existe pouca variação de temperatura e umidade, com coeficientes de variação de 0,15 e 0,13, respectivamente. O local estudado apresenta temperatura média de 28°C, e mais de 75% das observações apresentam a umidade dentro da faixa considerada ideal, segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006).

O coeficiente de variação de energia (0,35) e radiação (0,40) não são tão grandes, porém apresentaram observações com valores bastante elevados. A velocidade do vento apresentou baixo valor médio (0,47km/h) e desvio-padrão de 0,36km/h, indicando que há pouco vento na região.

A análise inicial dos dados sugeriu uma correlação significativa das variáveis Radiação, Temperatura e Umidade com a variável dependente Energia. Radiação e energia apresentaram correlação de 0,82, e temperatura e energia de 0,60. Isso significa que, quanto maior a variável independente, maior a energia gerada. Umidade e energia apresentaram correlação de -0,49, logo, quanto maior a umidade, menor a energia gerada. Velocidade do vento e energia não apresentaram correlação significativa. As Figuras 5 e 6 ilustram tais correlações.

Na sequência, foram estudados modelos de regressões lineares simples de cada uma das variáveis independentes com a variável Energia. Tais modelos, assim como os resultados das respectivas correlações, podem ser observados na Figura 7.

Tabela 1 - Análise visual da correlação entre as variáveis

| | Energia (Wh) | Radiação (W/m ²) | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Velocidade do Vento (km/h) |
|---------------|--------------|------------------------------|------------------|-------------|----------------------------|
| Média | 903,29 | 155,73 | 28,01 | 69,83 | 0,47 |
| Desvio-padrão | 311,83 | 62,19 | 4,25 | 9,59 | 0,36 |
| Mínimo | 11,11 | 5,52 | 16,35 | 40,62 | 0,02 |
| 1º Quartil | 728,52 | 116,86 | 25,40 | 64,05 | 0,22 |
| Mediana | 914,29 | 148,56 | 28,43 | 69,47 | 0,35 |
| 3º Quartil | 1093,71 | 202,103 | 31,23 | 76,00 | 0,64 |
| Máximo | 2673,81 | 353,39 | 37,36 | 95,74 | 1,95 |

Fonte: Próprio autor.

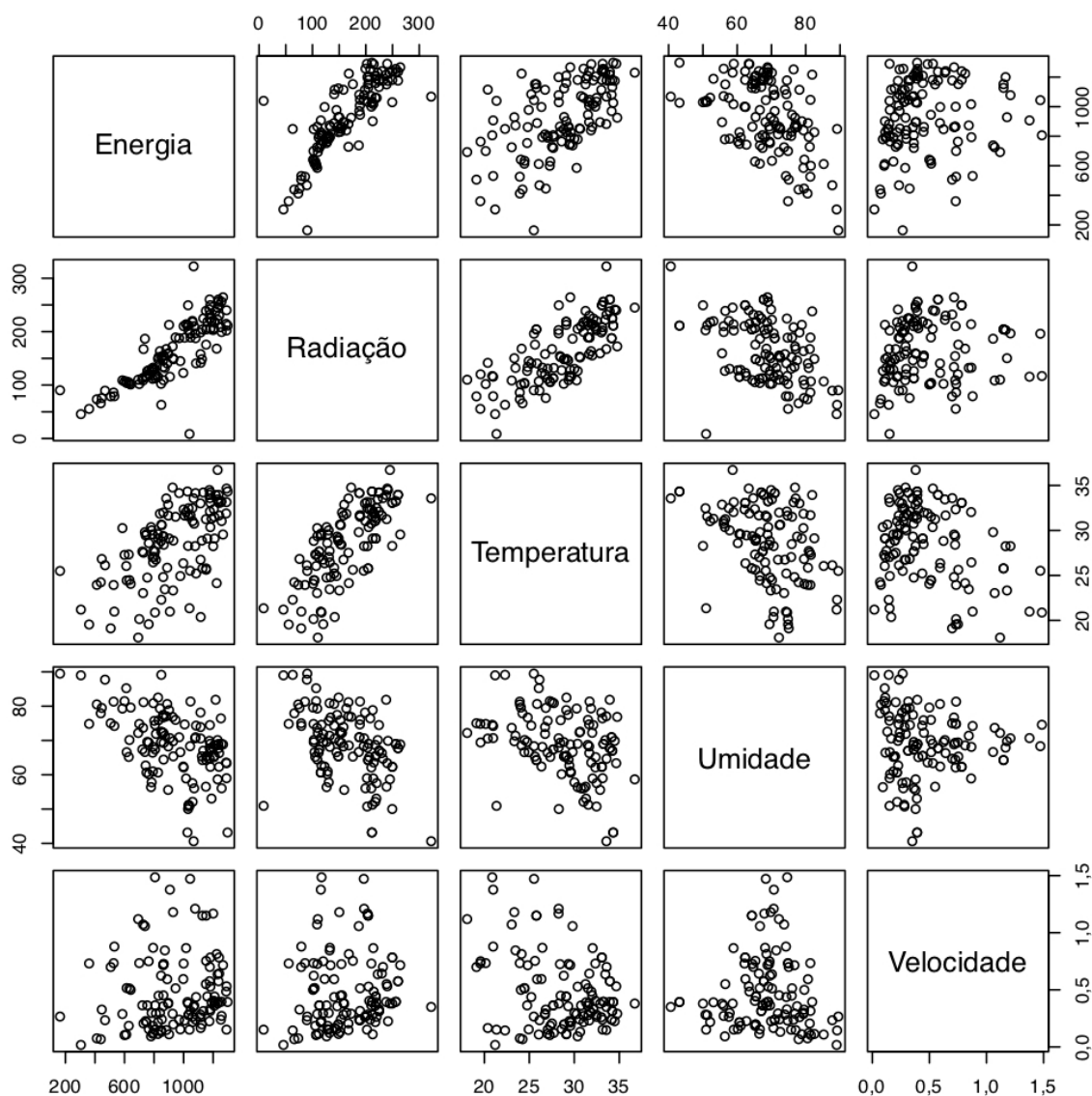


Figura 5 - Análise visual da correlação entre as variáveis. Fonte: Próprio autor.

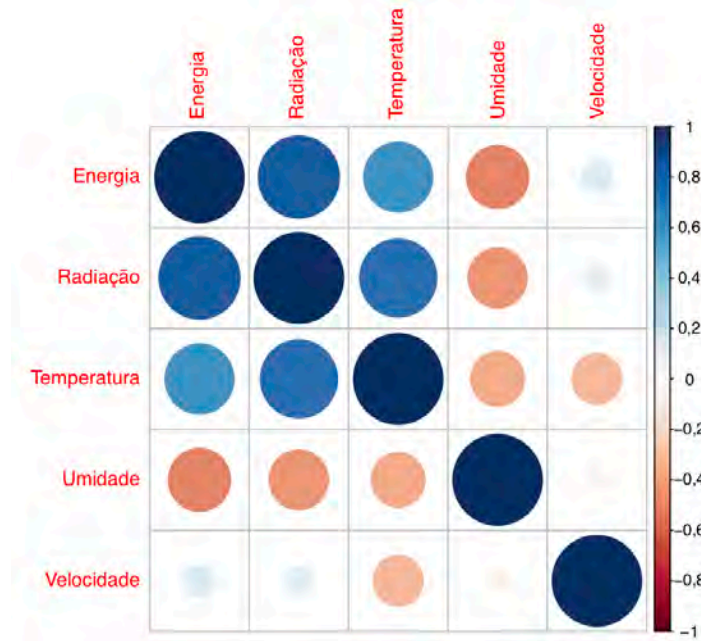


Figura 6 - Análise visual da correlação entre as variáveis. Fonte: Próprio autor.

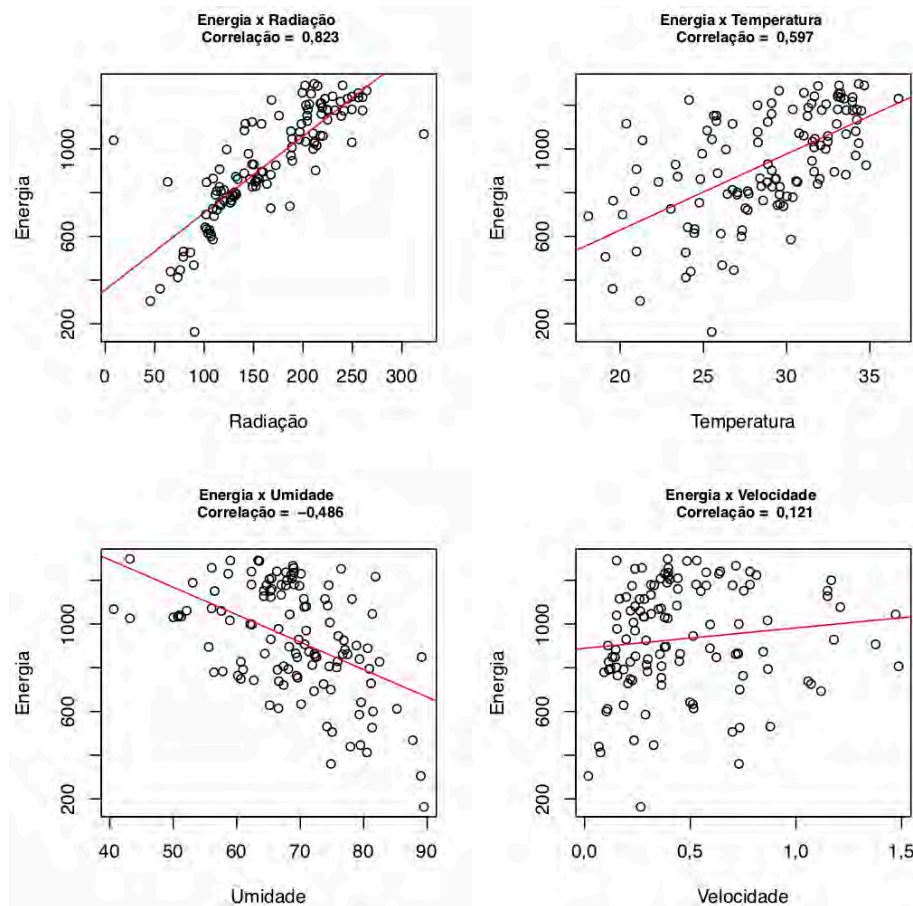


Figura 7 - Regressões lineares simples entre a Energia e as variáveis explicativas candidatas. Fonte: Próprio autor.

Ao observar-se os modelos de regressão linear, apenas as variáveis Radiação, Temperatura e Umidade apresentaram coeficientes não nulos para uma significância de 5%.

Como a Radiação apresentou maior correlação, o modelo de regressão linear múltipla foi estudado a partir do modelo simples, Energia em função da Radiação, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Regressão com apenas Radiação como variável explicativa

| Coefficientes | Estimador | Desvio-padrão | Valor t | Pr(> t) |
|---|-----------|---------------|---------|--------------|
| Intercepto | 355,49 | 38,81 | 9,16 | 1,94e-15 *** |
| Radiação | 3,51 | 0,22 | 15,76 | < 2e-16 *** |
| Signif: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1 | | | | |

Fonte: Próprio autor.

Na sequência foi acrescentada a segunda variável com poder explicativo, Temperatura, e não foi observada a melhora do modelo, pois R^2 passou de 0,6753 para 0,6732, sendo assim descartada esta variável, conforme apresentada na Tabela 3. Note-se que, para o segundo modelo, observou-se o R^2 ajustado, de modo a evitar excesso de variáveis e evitar multicolinearidade.

Tabela 3 – Regressão com Radiação e Temperatura como variáveis explicativas

| Coefficientes | Estimador | Desvio-padrão | Valor t | Pr(> t) |
|---|-----------|---------------|---------|--------------|
| Intercepto | 399,63 | 98,77 | 4,056 | 9,38e-05 *** |
| Radiação | 3,63 | 0,34 | 10,84 | < 2e-16 *** |
| Temperatura | -2,23 | 4,59 | -0,49 | 0,63 |
| Signif: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1 | | | | |

Fonte: Próprio autor.

O próximo modelo proposto contemplou Radiação e Umidade como variáveis explicativas obtendo melhora no valor de coeficiente de determinação ajustado, que passou de 0,6753 para 0,6918. Os valores da nova regressão estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Regressão com Radiação e Umidade como variáveis explicativas

| Coefficientes | Estimador | Desvio-padrão | Valor t | Pr(> t) |
|---|-----------|---------------|---------|--------------|
| Intercepto | 675,63 | 124,12 | 5,44 | 2,93e-07 *** |
| Radiação | 3,22 | 0,24 | 13,34 | < 2e-16 *** |
| Umidade | -3,97 | 1,47 | -2,71 | 0,00781 ** |
| Signif: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1 | | | | |

Fonte: Próprio autor.

A fim de confirmar o modelo proposto onde a Energia seria explicada pelas variáveis Radiação e Umidade, o procedimento foi repetido 10.000 vezes.

Foram tomadas 10.000 amostras aleatórias distintas nos mesmos moldes da amostra inicial, ou seja, amostras de tamanho 120, sendo 30 amostras por inversor.

Para cada amostra foi construído o modelo de regressão múltipla, considerando todas as variáveis. Isto foi feito com o objetivo de desconsiderar a aleatoriedade da amostragem e ainda permitir a extrapolação do modelo para outros locais de análise. A Tabela 5 apresenta os resultados do *bootstrap*. Todas as variáveis são não nulas para um nível de significância de 5%. A última coluna apresenta o percentual de coeficientes significativos a um nível de 5%, para cada uma das variáveis no modelo de regressões múltipla.

Tabela 5 - Resultados do *bootstrap*

| | Estimador médio | Desvio-padrão | Resultados significativos (%) |
|-------------|-----------------|---------------|-------------------------------|
| Radiação | 3,93 | 0,62 | 100,00 |
| Temperatura | -1,20 | 6,90 | 6,76 |
| Umidade | -3,16 | 2,26 | 33,18 |
| Velocidade | 17,81 | 56,88 | 7,88 |

Fonte: Próprio autor.

Observando a Tabela 5, nota-se que a variável radiação possui relação direta com a geração de energia fotovoltaica. A umidade foi significativa em 33% dos casos. Apesar de no modelo inicial ela não ter se mostrado significativa, os resultados do *bootstrap* dão indícios de que ela não pode ser descartada. Interessante notar que a umidade possui uma relação inversa com a energia gerada. Isso pode ser explicado pelo fato de que uma maior umidade do ar pode indicar formações de nuvens e precipitação, causando um bloqueio parcial do sol e, por consequência, uma redução na geração de energia.

As variáveis temperatura e velocidade do vento foram significativas em 6,76% e 7,88% dos casos, respectivamente. A temperatura apresentou uma relação negativa com a geração de energia, indicando que quanto maior a temperatura, menor a geração de energia. Isto pode ser explicado pelo fato de o aquecimento da placa poder interferir na quantidade de energia gerada.

No caso da variável velocidade do vento, quanto maior a quantidade de vento, maior será a energia fotovoltaica gerada.

Finalmente foi implementado o *bootstrap* somente para os modelos de regressão linear simples, com radiação prevendo quantidade de energia gerada por módulo. Foram plotadas num mesmo gráfico as regressões lineares das 10.000 amostras, e através da média aritmética dos valores dos coeficientes dessas regressões foi obtido o modelo 1:

$$\text{Energia} = 4,17 * \text{Radiação} + 248,71 \quad (1)$$

também plotado, em preto, no mesmo gráfico, apresentado na Figura 8. É possível observar a tendência do modelo, bem como os intervalos de confiança gerados pelas variações possíveis do coeficiente de radiação. Quanto mais próximos dos valores extremos de radiação observados, maiores as chances de o modelo se comportar de maneira inesperada.

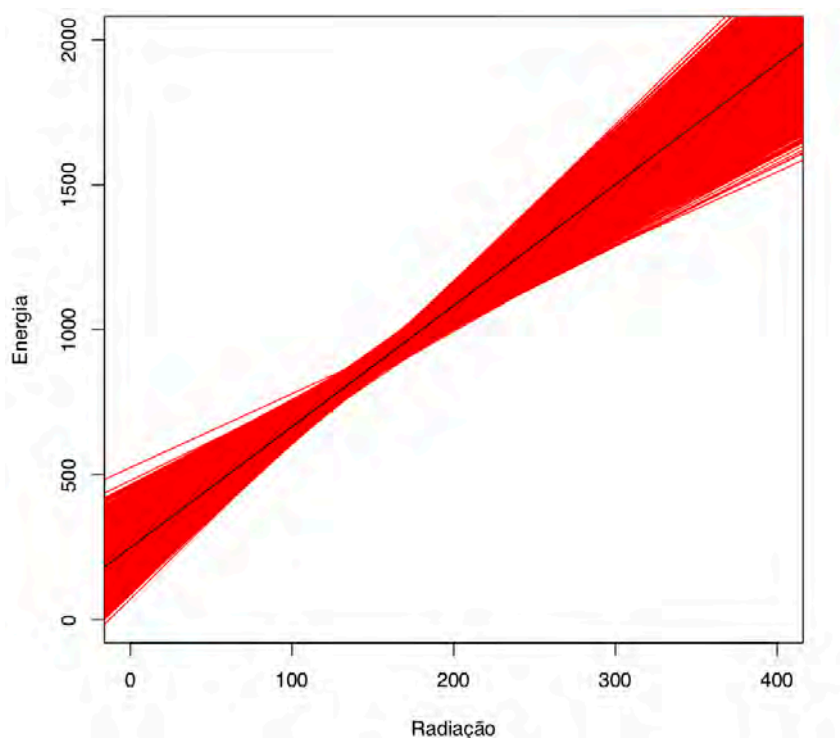


Figura 8 - Modelo Energia em função da Radiação. Fonte: Próprio autor.

Conclusões

Este trabalho buscou identificar quais fatores meteorológicos explicam a energia gerada por painéis fotovoltaicos. Foram considerados dados de Radiação, Temperatura, Umidade e Velocidade do vento, no período de março de 2017 a setembro de 2018, cedidos pelo Smart Campus Facens. Tais variáveis foram consideradas como variáveis independentes do modelo proposto, que buscava explicar a variável dependente Energia.

Para evitar a influência da autocorrelação dos dados das variáveis independentes, o estudo foi feito tomando-se amostras de dias aleatórios.

A análise final dos dados nos levou a concluir que a variável dependente Energia era explicada pela variável Radiação. Entretanto, ao analisarmos os resultados do *bootstrap* para as demais variáveis, conclui-se que estas não podem ser inteiramente descartadas. Neste caso, temperatura e umidade apresentaram comportamento indireto com a energia gerada. Possivelmente por questões de aquecimento de equipamentos e formações chuvosas

Os resultados demonstram uma potencial geração de energia solar fotovoltaica em diversos locais no Brasil, pois mais do que quantidade de dias ensolarados, o mais importante é a quantidade de incidência de radiação solar.

Estudos futuros considerarão dados de outras localidades geográficas. Outra oportunidade de estudo é considerar modelos não lineares para modelar a interferência negativa de altas temperaturas na geração de energia fotovoltaica.

Referências

Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2012). *Resolução Normativa n. 517, 11 de dezembro de 2012. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST*. Brasil: ANEEL.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2017). *NBR ISO 37120:2017. Desenvolvimento sustentável de comunidades – Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida*. Rio de Janeiro: ABNT.

Bandara, H. M. A. P. K., Jayalath, J. D. C., Rodrigo, A. R. S. P., Bandaranayake, A. U., Maraikar, Z., & Ragel, R. G. (2016). Smart campus phase one: smart parking sensor network. In *2016 Manufacturing and Industrial Engineering Symposium: Innovative Applications for Industry*. Colombo, Sri Lanka: MIES. <http://dx.doi.org/10.1109/MIES.2016.7780262>

Bent, E., Crowley, M., Nutter, M., & Wheeler, C. (2017). *Getting smart about smart cities: USDN Resource Guide*. San Francisco: Nutter Consulting. Retrieved in 2019, agosto 20, from <http://us.sustain.org/wp-content/uploads/2017/01/Smart-Cities-RG.pdf>

Borsekova, K., Koróny, S., Vaňová, A., & Vitálišová, K. (2018). Functionality between the size and indicators of smart cities: a research challenge with policy implications. *Cities*, 78, 17-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2018.03.010>.

Brasil. Ministério de Minas e Energia – MME. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. (2018). *Balanco Energético Nacional 2018: ano base 2017*. Rio de Janeiro: EPE.

Clerici, A., & Assayag, M. (2013). *World Energy Resources: 2013 Survey*. London:

Dias, C. L. D. A., Branco, D. A. C., Arouca, M. C., & Legey, L. F. L. (2017). performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. *Renewable Energy*, 114, 367-375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.033>.

Didoné, E. L., Wagner, A., & Pereira, F. O. R. (2017). avaliação da influência do contexto urbano na radiação solar para geração de energia. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 9(Suppl. 1), 408-424. <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.009.sup1.ao012>.

- Ferreira, A., Kunh, S. S., Fagnani, K. C., Souza, T. A., Tonezer, C., Santos, G. R., & Coimbra-Araújo, C. H. (2018). Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 181-191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>.
- Galego, D., Giovannella, C., & Mealha, O. (2016). Determination of the smartness of a university campus: the case study of Aveiro. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*, 223, 147-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.336>.
- Giffinger, R., Fertner, C., Karmar, H., Kalasek, R., Pichler-Milanovic, N., & Meijers, E. (2007). *Smart cities: Ranking of European medium sized cities*. Vienna: Center of Regional Science, Vienna University of technology.
- Giovanella, C., Andone, D., Dascalu, M., Popescu, E., Rehm, M., & Roccasalva, G. (2015). Smartness of learning ecosystems and its bottom-up emergence in six European campuses. In *The European Conference on Technology Enhanced Learning*. Toledo, Spain: EC-TEL.
- Glaeser, E. L., & Berry, C. (2006). Why are smart places getting smarter? *Policy Brief*, 2, 1-4.
- Holdermann, C., Kissel, J., & Beigel, J. (2014). Distributed photovoltaic generation in Brazil: an economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy*, 67, 612-617. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.064>.
- Huld, T., & Pinedo-Pascua, I. (2017). *JRC Photovoltaic geographical information system*. Retrieved in 2019, Agosto 20, from https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/G_opt_DE.pdf
- Hwang, G. J. (2014). Definition, framework and research issues of smart learning environments - a context-aware ubiquitous learning perspective. *Smart Learning Environments*, 1(4), 1-14. <http://dx.doi.org/10.1186/s40561-014-0004-5>.
- Kleiber, C., & Zeileis, A. (2008). *Applied econometrics with R (Use R!)*. New York: Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-77318-6>.
- Lacchini, C., & Rütther, R. (2015). The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. *Renewable Energy*, 83, 786-798. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.045>.
- Marques, S. B., Bissoli-Dalvi, M., & Alvarez, C. E. (2018). Políticas públicas em prol da sustentabilidade na construção civil em municípios brasileiros. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 10(Supl. 1), 186-196. <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.010.supl1.a010>.
- Martins, R. F., & Pereira, E. B. (2011). Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. *Energy Policy*, 39(7), 4378-4390. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.058>.
- Organização das Nações Unidas – ONU. (2015). *Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. New York: ONU. Retrieved in 2019, agosto 20, from http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
- Orioli, A., & Di Gangi, A. (2014). Review of the energy and economic parameters involved in the effectiveness of grid-connected PV systems installed in multi-storey buildings. *Applied Energy*, 113, 955-969. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.014>.
- Pereira, A. O., Costa, R. C., Costa, C. D. V., Marreco, J. D. M., & La Rovere, E. L. (2013). Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 23, 49-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.020>.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rütther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G. (2017). *Atlas brasileiro de energia solar*. São José dos Campos: INPE.
- Perin, E. (2017). *Facens Improves Its Smart Campus via RFID, Internet of Things*. *RFID Journal* Retrieved May 6, 2019, from <https://www.rfidjournal.com/articles/view?16440/>
- R Core Team (2010). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna: Foundation for Statistical Computing.

- Rodrigues, S., Torabikalaki, R., Faria, F., Cafôfo, N., Chen, X., Ivaki, A. R., Mata-Lima, H., & Morgado-Dias, F. (2016). Economic feasibility analysis of small scale PV systems in different countries. *Solar Energy*, 9131, 81-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.019>.
- Rosales, N. (2017). How can an ecological perspective be used to enrich cities planning and management? *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 9(2), 314-326. <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.009.002.ao11>.
- Sastra, N. P., & Wiharta, D. M. (2017). Environmental monitoring as an IoT application in building smart campus of Universitas Udayana. In *2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems* (pp. 85-88). Bali: ICSGTEIS. <https://doi.org/10.1109/ICSGTEIS.2016.7885771>
- Silva, R. M. (2015). *Energia solar no Brasil: Dos Incentivos aos Desafios*. Brasília: Senado Federal, Consultoria Legislativa.
- Smart-Campus, F. (2018). *Smart Campus Facens ganha 2o prêmio internacional*. Retrieved May 6, 2019, from <https://facens.br/noticias/smart-campus-facens/smart-campus-facens-ganha-2-premio-internacional>
- Stensjö, I. P., Ferreira, C. C., & Loura, R. M. (2017). Classificação e agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento: 1960 a 2013. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 9(Supl.1), 286-300. <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.009.supl1.ao03>.
- Stilpen, D. V. S., & Cheng, V. (2015). Solar photovoltaics in Brazil: A promising renewable energy market. In *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference*. Marrakech: IRSEC. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455077>
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289-296. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6).
- Viana, T. S., Ruther, R., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2011). Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy*, 85(3), 486-495. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.015>.
- Weiss, M. C., Bernardes, R. C., & Consoni, F. L. (2015). Smart cities as a new practice for urban services and infrastructure management: the experience of Porto Alegre. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 7(3), 310-324. <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.007.003.A001>.
- World Health Organization – WHO. (2006). *Air Quality Guidelines. Global Update 2005*. Copenhagen: WHO.

Editores: Janaina Camile Pasqual Lofhagen, Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR; Christopher Hawkins, University of Central Florida - UCF.

Recebido: Jan. 31, 2019

Aprovado: Abr. 22, 2019