

# METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM ÁREAS URBANAS E SUA APLICAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

**Davi Carneiro** - davibc@hotmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Graduação em Engenharia Elétrica

**Luís Guilherme Monteiro Oliveira** - luis.monteiro@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC/MG)

**Bruno Marciano Lopes** - bruno.marciano@cemig.com.br

Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Gerência de Alternativas Energéticas

**Eduardo Nohme Cardoso** - nohme@cpdee.ufmg.br

**Wadaed Uturbey da Costa** - wadaed@cpdee.ufmg.br

**Victor Flores Mendes** - victormendes@cpdee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** *Devido à crescente penetração de tecnologias de conversão de energias renováveis, em especial a tecnologia fotovoltaica, bem como advento de novas regulações aplicadas à geração distribuída (GD's) através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR's), surge um campo promissor para a expansão da matriz energética brasileira. Embora tenha-se essa visão, os estudos carecem de ferramentas capazes de mensurar com confiabilidade o valor exato do potencial energético representado pela luz solar convertida em sistemas fotovoltaicos. Neste artigo é descrito um método de levantamento do potencial de geração para os SFCR's baseado em análises estatísticas, bem como a sua aplicação na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). O ponto central do levantamento consiste em estimar o total de área de telhados disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos, que é obtido por meio de amostragens estatísticas, extrapolando-se os resultados para toda a população estudada. Ao final das análises, foram obtidos dados relativos ao potencial energético da RMBH ao longo de um ano típico, o que foi feito com o auxílio de dados solarimétricos medidos para a região, bem como estimado o potencial instalado de SFCR's.*

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Levantamento de Potencial, Metodologia

## 1. INTRODUÇÃO

A ideia deste trabalho surgiu no contexto do projeto “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção de Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira” (P&D CEMIG D713), que se originou a partir da chamada 013/2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2011). Primeiramente, o objetivo era ter uma compreensão maior do impacto dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR's) no sistema elétrico brasileiro, quantificando o potencial de geração dessa tecnologia através da geração distribuída (GD), uma vez que, com a publicação da resolução normativa (REN) nº 482/2012 / ANEEL (ANEEL, 2012) não foi localizada, a priori, nenhuma estimativa confiável do valor de energia a ser agregado ao sistema a partir dessa modalidade de conversão energética. Em um primeiro momento, a preocupação inicial deste estudo recaía unicamente em alcançar um valor de potencial estimado, sem se preocupar com muitos refinamentos do montante encontrado. Em um segundo momento, foram introduzidas análises de irradiação solar, projeções mercadológicas, fatores de rendimento dos SFCR's, entre outros.

Ao se trabalhar com metodologias de levantamento de potencial de geração solar fotovoltaica, o estudo inevitavelmente recaiu sobre três aspectos principais (EPE, 2014), a saber: mapeamento do recurso solar disponível, área de telhados para a instalação dos sistemas fotovoltaicos e a eficiência do processo de conversão de energia. Através da abordagem destes três pontos principais, tem-se na literatura registros de metodologias que buscam estimar o potencial de geração solar fotovoltaica, tal como é possível observar em Bergamasco *et al.* (2011), onde os autores estimam a área de telhados através da digitalização e filtragem de mapas, excluindo-se formas não poligonais de suas análises, bem como estimam a eficiência do processo de conversão e obtêm dados de irradiação solar previamente medidos. No trabalho de Lange (2012) tem-se uma abordagem que estima as áreas de telhados multiplicando-se o valor médio de área de telhados encontrado por Ghisi *et al.* (2006) pelo número de construções obtido junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) sendo que essa metodologia será abordada mais adiante no desenvolvimento deste trabalho.

De maneira sucinta, este estudo propõe a subdivisão e a classificação da região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) em áreas menores, dentro das quais foram encontrados padrões de ocupação típicos, que garantem, de forma razoável, a homogeneidade física dentro da área circunscrita. Após o mapeamento das áreas, coletam-se amostras no interior das unidades menores, que, por sua vez, fornecem dados de área líquida de telhados e área total amostrada. A

razão entre a área líquida de telhados e a área amostrada fornece uma porcentagem que pode ser aplicada para a totalidade das áreas mapeadas que apresentem o mesmo padrão de ocupação da área em que foi coletada a amostra, possibilitando a extrapolação dos resultados para todo o espaço mapeado. De posse das áreas líquidas de telhados para todas as unidades mapeadas, são feitas as análises e considerações pertinentes ao potencial de geração da RMBH sob dois enfoques distintos: o potencial energético e a potência de pico instalada.

A potência de pico instalada pode ser calculada com base na área líquida de telhados disponível para receber os módulos fotovoltaicos e na eficiência global do processo de conversão baseada em curvas de incidência solar normalizadas. Já para a análise de potencial energético, utiliza-se dados de irradiação solar medidos e compilados em 2012 pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em um estudo denominado “Atlas Solarimétrico de Minas Gerais” (CEMIG, 2012). De posse desses dados e do valor da potência de pico instalada de SFCR’s, pode-se calcular facilmente o potencial energético da RMBH para o ano todo, bem como para cada um dos meses típicos que marcam as quatro estações climáticas do ano.

## 2. LEVANTAMENTO DE ÁREAS POTENCIAIS PARA SFCR’S (METODOLOGIA)

Nesta seção são abordados os aspectos utilizados para o levantamento da área útil de telhados para instalação de SFCR’s. Primeiro define-se o espaço urbano e suas características e, posteriormente, apresenta-se o método estatístico utilizado para o levantamento e, desta forma, a metodologia para o mapeamento é descrita. Por fim, os resultados do processo são apresentados.

### 2.1 Espaço urbano

Observando-se detalhadamente as áreas urbanas, é possível perceber que, como um todo, nada mais são do que um espaço geográfico heterogêneo formado pela união de espaços menores, também heterogêneos entre si, porém, homogêneos em seu interior. A constatação de homogeneidade e heterogeneidade é feita sob o aspecto das edificações nele presentes, ou seja, o espaço urbano é um aglomerado de unidades menores que possuem padrões de ocupação específicos para as edificações em seu interior. Essas unidades menores do espaço, por sua vez, podem ser classificadas de acordo com o padrão físico e utilização das edificações, conforme propõe-se a seguir:

- 1) Regiões residenciais de baixa densidade (RBD): composição majoritária por casas e edificações de pequeno porte;
- 2) Regiões residenciais de alta densidade (RAD): edifícios de grande porte com espaçamento razoável dedicados principalmente à habitação;
- 3) Regiões comerciais (C): áreas centrais da RMBH, com espaçamento reduzido entre seus edifícios de grande porte, utilizados principalmente para abrigar escritórios e centros comerciais;
- 4) Regiões industriais (I): regiões periféricas da RMBH, com presença de grandes galpões e irregularidade de ocupação do espaço geográfico;
- 5) Comunidades carentes (CC): composição predominante de edificações de pequeno porte precárias e sem estrutura para receber a instalação de um SFCR.

### 2.2. Estatística

Dois conceitos fundamentais de estatística são necessários para se compreender este trabalho, estando ambos descritos por Magalhães *et al.* (2005). O primeiro deles é o de amostragem que é descrita como uma técnica que deve ser empregada sempre que a abordagem individual dos elementos de uma população for inviável, tomando-se um subgrupo da população para ser analisado ao invés de todo o espaço amostral. No contexto desta análise, torna-se inviável a medição da área de telhado de cada uma das edificações da RMBH. Tal barreira pode ser superada através da amostragem de certos blocos de construções que farão parte de amostras a serem coletadas.

O segundo conceito, que foi utilizado neste trabalho, diz respeito à inferência estatística. Esse processo é utilizado para a extrapolação dos resultados obtidos com a utilização da amostragem. Como a região amostrada é muito menor do que a área total a que pertence, pode-se dizer que a amostra armazena as mesmas características da população da qual foi extraída, mas, obviamente, em proporções reduzidas. Neste estudo, foi considerada a extrapolação da área líquida de telhados obtida através da medição de telhados efetuada nas construções circunscritas pela amostra.

### 2.3 Áreas mapeadas

O espaço urbano escolhido para a aplicação da metodologia foi a RMBH. Através da ferramenta computacional Google Earth Pro (GEP), efetuou-se a divisão da RMBH em unidades menores, identificando visualmente cada uma dessas unidades, bem como classificando as mesmas dentro de uma das categorias descritas na seção 2.1. Esta tarefa foi executada com o auxílio do “Polígono”, que permite a demarcação de espaços pelo usuário do GEP, bem como fornece medições de área para o espaço inscrito na demarcação. A Fig.1 mostra o mapeamento final obtido, para as regiões RAD, RBD, I, C e CC, onde as mesmas são identificadas pelas cores brancas, vermelhas, azuis, verdes e amarelas, respectivamente.

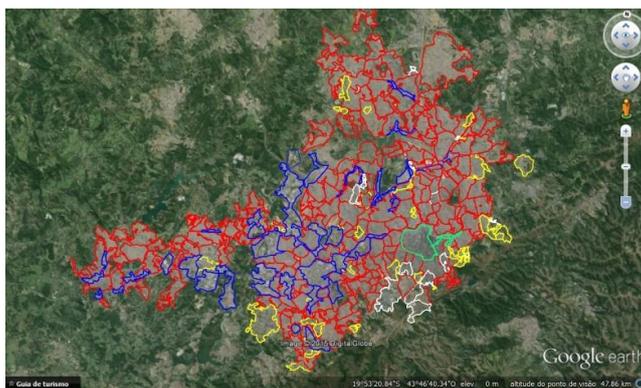


Figura 1 – Mapeamento da RMBH.

Cabe salientar que no processo de delimitação de cada uma das unidades, foi tomado um cuidado para não se incluírem grandes áreas não edificadas, tais como: campos de futebol, rodovias, parques, lagos, entre outros. Tal cuidado é válido, pois diminui o erro obtido no processo de extrapolação dos resultados, fornecendo, conseqüentemente, um resultado mais próximo do valor real.

Das cinco categorias de classificação das unidades mapeadas, somente uma não apresenta potencial considerável para a instalação de SFCR's, que é a categoria de regiões identificadas como comunidades carentes. As construções desse tipo de área não apresentam estrutura arquitetônica adequada para receber os módulos fotovoltaicos, além de existirem, nos medidores de energia desse tipo de região, constantes perdas comerciais na distribuição, vulgarmente chamadas de “gatos”, o que inviabiliza a medição adequada pela concessionária.

Dentro de cada um dos 4 tipos de unidades cujas construções provavelmente suportem os painéis fotovoltaicos (RBD, RAD, C e I), foi coletada uma amostra de área. O procedimento de amostragem utilizado foi a amostragem aleatória simples, descrita por Barbetta (2002). Basicamente, o procedimento de amostragem para cada uma das categorias consiste nos seguintes passos: 1) escolha aleatória de qualquer uma das unidades da categoria; 2) escolha aleatória de qualquer bloco (“quarteirão”) dentro da unidade; 3) mapeamento da área total amostrada utilizando –se o *Polígono*; 4) mapeamento da área líquida de telhados também com o *Polígono*.

Uma vez executadas essas quatro etapas, obtém-se o *Fator de Área*, que será dado pela razão entre a área líquida total de telhados da amostra e a área total circunscrita pela mesma. Pelo motivo desse procedimento ter sido executado no interior de uma unidade de área homogênea, ou seja, que apresenta um padrão característico de porte de construções e ocupação do espaço, o percentual dado pelo *Fator de Área* pode ser considerado como representativo para toda a unidade no interior da qual se coletou os dados, bem como para todas as outras unidades semelhantes àquela. Em outras palavras, os resultados obtidos pela amostragem permitem assumir que toda a unidade de onde foi retirada a amostra possui a mesma razão entre a área líquida de telhados e a área total circunscrita, pois o espaço é homogêneo, assim como o resultado também pode ser aplicado para todas as unidades semelhantes àquela onde foi coletada a amostra. A Fig. 2 ilustra a amostragem efetuada para a categoria RBD, onde o retângulo que envolve todo o bloco (“quarteirão”) representa a área total amostrada, e os polígonos menores representam, cada um deles, a área de um telhado diferente.

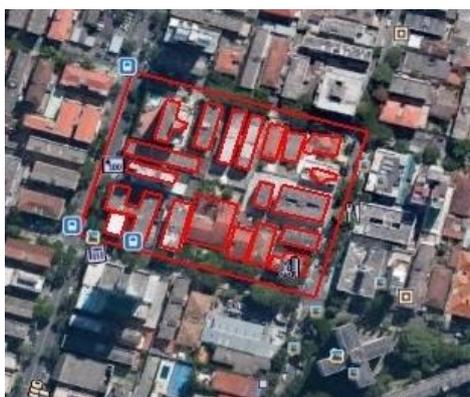


Figura 2 – Amostra coletada para categoria RBD.

## 2.4 Resultados do mapeamento

Os dados da Tab. 1 reúnem as áreas totais de todas as unidades mapeadas e classificadas dentro de cada uma das categorias, o respectivo fator de área obtido pelo processo de amostragem para cada uma delas, bem como o valor das áreas líquidas de telhados. Esse último dado é o de maior interesse para este estudo.

Tabela 1 – Resultados da Amostragem

Tipo de Região	Área Total Mapeada (m <sup>2</sup> )	Fator de Área	Área Líquida de Telhados (m <sup>2</sup> )
<b>RBD</b>	258.271.237,00	0,3606	93.132.608,06
<b>RAD</b>	11.779.530,00	0,2538	2.989.644,71
<b>I</b>	53.523.870,00	0,4880	26.119.648,56
<b>C</b>	7.149.824,00	0,3958	2.829.900,34
<b>Total</b>	<b>330.724.461,00</b>	-	<b>125.071.801,68</b>

Como é possível notar através da Tab.1, a área total mapeada ocupa um espaço de aproximadamente 330 milhões de metros quadrados (m<sup>2</sup>), sendo mais de 70% dessa área ocupada por casas e edificações de pequeno porte. Para as áreas líquidas de telhados tem-se um valor total aproximado de 125 milhões de m<sup>2</sup>, o que corresponde a cerca de 37% de todas as áreas mapeadas.

### 3. LEVANTAMENTO DOS POTENCIAIS DE GERAÇÃO ATRAVÉS DE SFCR'S

#### 3.1 Análise do recurso solar disponível

De posse do valor da área líquida de telhados, o ponto mais importante para dar prosseguimento aos trabalhos recai sobre o mapeamento do recurso solar disponível. Para tanto, foi utilizado o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais (CEMIG, 2012), que contém dados de irradiação solar global, em plano horizontal, coletados através de estações de medição em todo o estado. Apesar de a coleta ter sido feita em pontos discretos, foi possível obter os valores de irradiação solar global em todo o território de Minas Gerais utilizando-se uma técnica de interpolação. Para a RMBH, os valores aproximados de energia incidente fornecidos pelo Atlas, para cada um dos meses típicos das quatro estações do ano, dados em kWh/m<sup>2</sup>, são mostrados na Tab. 2.

Tabela 2 – Dados solarimétricos para a RMBH.

Mês do ano	Irradiação Solar Média Mensal (kWh/m <sup>2</sup> .dia)	Horas de Sol Pleno/dia
Janeiro	5,50	5,50
Abril	5,25	5,25
Julho	4,75	4,75
Outubro	5,50	5,50

É importante salientar que esses valores de irradiação solar equivalem à incidência em plano horizontal, sem qualquer tipo de inclinação que maximize a conversão fotovoltaica. Outro dado importante da Tab. 2 diz respeito à quantidade de horas de sol pleno por dia para cada um dos meses abordados. Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CEPEL/CRESESB, 2014), a utilização desse dado pressupõe a incidência solar com valor igual a 1 kW/m<sup>2</sup> durante todo o dia, de tal maneira que é possível remodelar o formato da curva de incidência solar real, mas mantém-se o valor de energia total recebida de maneira a facilitar os cálculos e análises, conforme ilustrado na Fig. 3.

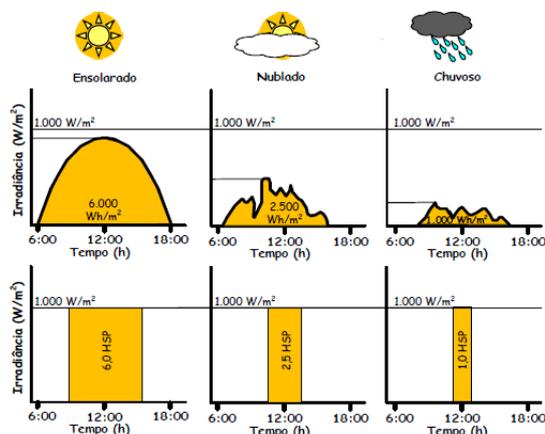


Figura 3 – Horas de Sol Pleno para diferentes perfis de irradiância.

Fonte: CRESESB/CEPEL (2014)

Para as análises seguintes, foi considerada sempre a curva de incidência solar normalizada, ou seja, pressupõe-se que toda a energia solar incidente atinge os módulos fotovoltaicos com intensidade de 1 kW/m<sup>2</sup>, de tal modo que podemos utilizar a grandeza Horas de Sol Pleno para quantificar a energia que será convertida sem a necessidade de efetuar qualquer normalização nos fatores de eficiência de conversão energética próprios dos módulos fotovoltaicos.

### 3.2 Eficiência dos SFCR's

Os SFCR's são sistemas compostos por componentes que possuem eficiências diferentes no processo de conversão. Para o SFCR, como um todo e para uma primeira aproximação, o valor global de aproveitamento da energia recebida pode ser obtido através da aplicação sucessiva dos valores de rendimento de cada um de seus componentes sobre o montante bruto de energia recebido pela área dos painéis fotovoltaicos, uma vez que trata-se de um sistema em cascata.

Nos SFCR's as duas principais fontes de perda de energia são os módulos fotovoltaicos e o inversor. Para os módulos, a eficiência de conversão depende diretamente da tecnologia de fabricação das células. Segundo Tolmasquim (2003), valores típicos para a eficiência de conversão para as células de silício monocristalino são da ordem de 15%. Já para as células de silício policristalino obtém-se 13% como valor para a mesma variável de acordo com Niedzialkoski (2013). Os inversores, por sua vez, possuem valores típicos de eficiência, quando utilizados em processos de conversão com altos fatores de potência, estimados em 90% ou mais (CEPEL/CRESESB, 2014). De posse desses valores, encontra-se a eficiência global de um SFCR pela Eq. (1). Nessa equação,  $\eta_g$  representa o valor da eficiência global do sistema,  $\eta_i$  representa a eficiência do inversor e  $\eta_p$  representa a eficiência dos painéis.

$$\eta_g = \eta_i \times \eta_p \quad (1)$$

A Tab. 3 contém os valores de eficiência global do sistema para cada uma das tecnologias de fabricação das células fotovoltaicas.

Tabela 3 – Eficiência dos componentes e eficiência global para os SFCR's.

Tecnologia do Painel	$\eta_i$ (%)	$\eta_p$ (%)	$\eta_g$ (%)
Si-Mono	90,0	15,0	13,5
Si-Poli	90,0	13,0	11,7

Vale ressaltar que os valores de eficiência dos módulos fornecidos nos catálogos dos fabricantes dos painéis fotovoltaicos são obtidos em ensaios onde a irradiação solar incidente sobre o módulo é exatamente igual a 1 kW/m<sup>2</sup> (CANADIAN SOLAR INC, 2015), ou seja, a eficiência que normalmente se atribui ao sistema de conversão fotovoltaico é medida sob condições de sol pleno, tal como se considera a irradiação neste estudo. Portanto, essas eficiências podem ser diretamente utilizadas nos cálculos sem qualquer necessidade de normalização. Vale lembrar que que as perdas ocorridas nos condutores, do lado c.c. e lado c.a, ocasionadas por poeira, descasamento (*mismatching*, em inglês), sombreamentos e etc. foram desprezadas neste primeiro trabalho.

### 3.3 Resultados para o potencial de geração fotovoltaica na RMBH

A análise do potencial de geração fotovoltaica para a RMBH pode ser desenvolvida sob dois aspectos distintos. O primeiro, diz respeito à potência de pico instalada, que será um valor invariável ao longo do ano, e a segunda, diz respeito à energia total gerada, que depende das condições de irradiação solar de cada período analisado. Abordando o primeiro aspecto, pode-se calcular o potencial de pico instalado em toda a RMBH em função exclusiva da área de telhados ocupada pelos módulos fotovoltaicos. Como as curvas de irradiação foram normalizadas para condições de irradiação de 1 kW/m<sup>2</sup>, é possível estimar qual será a porcentagem da energia que será efetivamente convertida em cada m<sup>2</sup>, observadas as eficiências do processo de conversão estabelecidas na Tab. 3.

Conhecido o valor da potência de pico instalada por m<sup>2</sup>, foi realizada a multiplicação deste valor pela área total de telhados disponível na RMBH, que pode ser encontrado na Tab. 1, para encontrar o valor total do potencial instalado, conforme mostra a Tab. 4, que pressupõe ocupação de 100% da área líquida de telhados estimada.

Tabela 4 – Levantamento da potência de pico instalada para a RMBH com 100% de ocupação das áreas líquidas de telhado estimadas.

Tecnologia do painel	$\eta_g$ (%)	Potência de Pico Instalada (kW/m <sup>2</sup> )	Potência de Pico Total (GW)
Si-Mono	13,5	0,135	16,885
Si-Poli	11,7	0,117	14,633

Para a abordagem de potencial energético, a partir dos valores totais de potência de pico instalada na RMBH pode-se obter o valor total de energia gerada pelos SFRC's para um dia típico de cada uma das estações do ano, conforme apresenta a Tab. 5 e a Tab.6 respectivamente.

Tabela 5 – Potencial energético da RMBH utilizando-se painéis de Si-Mono (100% de ocupação das áreas líquidas de telhado estimadas.).

Mês do ano	Horas de Sol Pleno	Energia Total Gerada (GWh/dia)
Janeiro	5,50	92,86
Abril	5,25	88,65
Julho	4,50	75,98
Outubro	5,50	92,86

Tabela 6 – Potencial energético da RMBH utilizando-se painéis de Si-Poli (100% de ocupação das áreas líquidas de telhado estimadas.).

Mês do ano	Horas de Sol Pleno	Energia Total Gerada (GWh/dia)
Janeiro	5,50	80,48
Abril	5,25	76,82
Julho	4,50	65,85
Outubro	5,50	80,48

#### 4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Em outubro de 2014 foi divulgada a nota técnica DEA n° 19/14 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), intitulada “Inserção de Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionante e Impacto” (EPE, 2014). Essa nota utiliza a metodologia descrita por Lange (2012) para calcular o potencial de geração distribuída fotovoltaica em todo o país, porém somente avalia o potencial dos consumidores residenciais, desprezando-se os demais nichos de mercado.

De maneira sucinta, a metodologia empregada recorre a uma base de dados obtida junto ao IBGE para encontrar o número total de domicílios, sejam eles casas ou apartamentos, atribuindo-se um valor médio de área de telhados igual a 85m<sup>2</sup> e 15m<sup>2</sup>, respectivamente, para cada um desses tipos de edificação. Tais valores foram obtidos a partir de um estudo realizado por Ghisi *et al.* (2006). Em seguida, aplica-se um fator de utilização de telhados, igual a 30%, sobre a área total obtida, encontrando-se um valor final de área de telhados efetivamente utilizada para a instalação dos SFRC's. A partir deste ponto, são estimados os potenciais técnicos e energéticos, assim como foi feito neste trabalho, baseados em dados solarimétricos obtidos junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e assumindo-se uma eficiência global do processo de conversão energética igual a 12%. A Tab. 7 contém o comparativo dos resultados entre as duas metodologias, com alguns pontos em comum e algumas diferenças que devem ser assinaladas: 1) A metodologia empregada pela EPE aborda o estado de Minas Gerais inteiro, ao passo que a metodologia utilizada neste estudo apenas cobre a RMBH. 2) os dados irradiação solar deste trabalho foram obtidos junto ao Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, tendo a média anual de horas de sol pleno sobre a RMBH valor igual 5 horas (kWh / m<sup>2</sup>.dia). Os dados da outra metodologia foram obtidos junto ao INPE. 3) para melhorar a comparabilidade entre os dois resultados, nesta seção também foi aplicado o fator de 30% para utilização efetiva dos telhados, bem como adotado o mesmo valor de 12% para a eficiência global do processo de conversão. 4) Segmentos industriais e comerciais não foram computados para as estimativas da Tab. 7, pois a EPE não os computou em seu levantamento.

Tabela 7 – Comparativo de potencial energético

Procedimento de Análise	Área Abrangida	Potencial Energético (GWh/ano)
Metodologia 1 (EPE)	MG	32.193
Metodologia 2	RMBH	6.314

Conforme é possível observar na Tab. 7, para a RMBH, estima-se um potencial energético para segmentos residenciais que equivale a 19,6% de todo o potencial estimado para o estado de Minas Gerais de acordo com a EPE. Embora não seja possível efetuar comparações diretas entre os resultados obtidos pelas duas metodologias, pelo motivo simples de abrangerem áreas distintas em seus levantamentos, é possível haver uma comparação indireta.

Segundo o censo demográfico realizado pelo IBGE em 2010, 5.414.701 pessoas habitavam a RMBH. Esse número representa cerca de um quarto da população total do estado de Minas Gerais, que foi estimada em 19.595.309

peças pelo mesmo estudo. Assumindo-se razoavelmente que o número de domicílios cresce linearmente com a população, ter-se-ia na RMBH um quarto de todos os domicílios de Minas Gerais, o que, conseqüentemente, seria responsável por algo em torno de um quarto de todo o potencial energético estimado para o estado. Partindo-se desse pressuposto, encontra-se o valor indiretamente estimado pela EPE para a RMBH, aproximado em 8.048 GWh/ano, ou seja, um montante 27,5% maior que o valor estimado utilizando-se a metodologia aqui exposta, que foi de 6.314 GWh/ano.

Ambos os potenciais energéticos levantados, assim como ambas as metodologias de levantamento apresentadas, baseiam-se em estimativas. Não existe um valor tido como absoluto, pois trabalha-se com aproximações de valores reais. Embora tenha havido uma diferença relativamente grande entre os dois potenciais apresentados, algo em torno de 27,5% conforme exposto anteriormente, não existe margem de erro elaborada para ambas as metodologias, o que impossibilita afirmar qual delas foi mais precisa. Além do mais, não existe um valor conhecido para este potencial, pois ele nunca foi medido de maneira direta, ou seja, não se conhece a área exata dos telhados, pois sempre se utiliza estimativas, impossibilitando a comparação de desempenho de ambas no que diz respeito a descrever a realidade. Apesar de tudo, pode-se inferir que os valores convergem para um intervalo entre 5.000 GWh/ano a 10.000 GWh/ano, servindo como uma boa noção, para uma primeira avaliação do montante real do potencial energético disponível na RMBH.

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia para levantamento de potencial de geração solar fotovoltaica em áreas urbanas ora apresentada consistiu no mapeamento da RMBH, subdividindo o espaço urbano em unidades menores e classificando essas unidades dentro de uma das cinco categorias onde encontra-se ocupação homogênea do espaço geográfico, a saber: RAD, RBD, C, CC e I. Após o mapeamento, para as categorias que apresentam potencial fotovoltaico considerável, foram coletadas amostras em seus interiores, circunscrevendo-se uma determinada área total amostrada e analisando-se o percentual que a área de telhados representa nessa área amostrada. Esse percentual foi denominado *Fator de Área*, sendo utilizado para a extrapolação dos resultados da amostragem através da multiplicação do mesmo pelo valor total das áreas classificadas dentro da mesma categoria na qual a amostra foi coletada, uma vez que dentro de espaços homogêneos o dado amostrado é considerado representativo da realidade da população.

Em um segundo momento, de posse do valor da área líquida de telhados disponível para a instalação dos SFCR's, bem como de medições solarimétricas relativas à RMBH, foram levantados dados a respeito da potência de pico possível de ser instalada sobre a RMBH, bem como do potencial energético disponível, ambos considerando uma ocupação de 100% dos telhados disponíveis. Por último, foi elaborada uma análise comparativa indireta entre o método desenvolvido nesta análise e o método empregado pela EPE para o levantamento de potencial em todo o Brasil, assumindo-se as mesmas premissas que serviram de base para o levantamento de potencial divulgado na nota técnica de 2014 (EPE, 2014).

Os resultados indicaram um potencial instalado possível de ser alcançado na RMBH com valores estimados em torno de 15,8 GWp (considerando-se a média obtida para os valores de painéis de Si-Mono e Si-Poli), o que mostra o quão grande o segmento de GD fotovoltaica pode ser na matriz energética brasileira. No entanto, para se alcançar esse valor seria necessária uma ocupação de 100% dos telhados, o que é pouco factível na realidade. Adotando-se as premissas da EPE, dentre as quais tem-se ocupação efetiva de 30% dos telhados, ter-se-ia algo em torno de 3,47 GWp instalados, um montante muito menor do que o inicialmente estimado, porém ainda significativo.

Para os potenciais energéticos, dentre os valores mais altos tem-se 92,86 GWh/ano (em janeiro) considerando-se 100% de ocupação dos telhados por painéis de silício monocristalino, ao passo que, se a tecnologia utilizada for o silício policristalino, o valor cai para 80,48 GWh/ano. Na época que ocorrem as mais fracas incidências solares, que é no mês de julho, os valores de energia gerada para painéis de silício monocristalino e policristalino ficam em torno de 75,98 e 65,85 GWh/ano respectivamente. Esses dados mostram que o recurso solar, sem dúvida alguma, não seria um fator limitante à expansão dos SFCR's e que pode haver diferenças significativas no montante total de energia gerada ao se optar por uma tecnologia de painéis ou pela outra. Ainda tratando de potencial energético, através de uma comparação indireta entre o potencial estimado pela EPE e o aqui apresentado, adotando-se para ambos as mesmas premissas, tem-se uma noção da energia total gerada pela RMBH, pois ambas as metodologias indicaram um valor entre 5.000 e 10.000 GWh/ano.

Com o intuito de refinar essa metodologia, propõe-se a continuidade dos trabalhos voltando-se a análise para o cômputo de efeitos que influenciam negativamente o processo de conversão, tal como o sombreamento ocasionado por árvores, edifícios, nuvens e outros elementos, bem como suas variações ao longo do dia. A modelagem simplificada de tais efeitos geralmente é feita aplicando-se um fator de redução da energia incidente sobre os SFCR's, uma vez que sua modelagem é bastante complexa e, neste estudo, foi desprezada. Também se propõe a criação de um software que trabalhe com processamento de imagens, de forma a reconhecer padrões de ocupação do espaço geográfico, definindo áreas típicas e reduzindo drasticamente o tempo gasto no processo de mapeamento das regiões estudadas.

### *Agradecimentos*

Trabalho desenvolvido no âmbito do programa de P&D Estratégico: "Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira", da ANEEL, CEMIG - D713.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. Chamada 013:2011 – Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”. Brasília, 2011.
- ANEEL. *Resolução Normativa n. 482*, de 17 de Abril de 2012. Brasília, 2012.
- BARBETTA, P. A., 2002. Estatística Aplicada às Ciências Sociais, 5ª edição, Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BERGAMASCO, L. and Asinari, P, 2011. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: application to Piedmont Region(Italy). *Solar Energy*, v. 85, p.1041–55.
- CANADIA SOLAR INC, 2015. Datasheet V5.3\_EN: PV Module CS6P – 260|265P
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, CEMIG, Belo Horizonte.
- CRESESB/CEPEL., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica; CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar Sérgio de Salvo Brito, Rio de Janeiro.
- EPE, 2014. Nota Técnica DEA 19/14 – Inserção de Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro.
- GHISI, E. et al, 2006. Potential for potable water savings by using rainwater: An analysis over 62 cities in southern Brazil. *Building and Environment*, Volume 41, Issue 2, pp.204–210.
- LANGE, W. 2012. Metodologia de Mapeamento da Área Potencial de Telhados de Edificações Residenciais no Brasil para Fins de Aproveitamento Energético Fotovoltaico. Empresa de Pesquisa Energética/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, estudo interno elaborado por meio da TerraGIS, Rio de Janeiro.
- MAGALHÃES, N.M., de Lima, A.C.P., 2005. Noções de Probabilidade e Estatística, 6ª edição revisada, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- NIEDZIALKOSKI, R. K., 2013. Desempenho de Painéis Solares Mono e Policristalinos em um Sistema de Bombeamento de Água. Tese (Mestrado em Energia na Agricultura), UNIOESTE, Cascavel – PR.
- TOLMASQUIM, M. T., 2003. Fontes Renováveis de Energia no Brasil, Editora Interciência, Cinergia, Rio de Janeiro

## METHODOLOGY FOR ESTIMATED THE POTENTIAL PHOTOVOLTAIC GENERATION IN URBAN AREAS AND ITS APPLICATION IN THE METROPOLITAN REGION OF BELO HORIZONTE

**Abstract.** *Due to the increasing penetration of renewable energy conversion technologies, especially photovoltaic technology and advent of new regulations applied to distributed generation (DG's) through photovoltaic systems connected to the grid (SFCR's), there is a promising field for the expansion of Brazilian energy matrix. Although from this point of view, studies need to be able to measure reliably tools the exact amount of energy potential represented by sunlight converted into electricity through the grid PV systems. In this paper, it will be described a method for evaluation of the potential of photovoltaic generation in urban areas, it is based on statistical analysis, and it was applied their application in the region metropolitan of Belo Horizonte (RMBH). The focus of the methodology proposed is to estimate the total area of rooftops available for the installation of photovoltaic modules, which will be achieved by means of statistical sampling, extrapolating the results to the entire region. Finally, the analysis, it is expected to obtain data on RMBH the energy potential over a typical year, has been done with the help of solarimetric measured data for the region, and to estimate the potential installed grid PV systems .*

**Key words:** *Photovoltaic Solar Energy, Potential Evaluation, Methodology.*