

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA GENERAR ENERGÍA DENTRO DE CENTROS URBANOS UBICADOS EN EL TRÓPICO, CASO MEDELLÍN.

Laura Rendón G.

Arquitecta, Docente Investigadora, Magister en arquitectura y urbanismo del programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC, laura.rendon@usbmed.edu.co
Universidad de San Buenaventura, Seccional Medellín. Bello, Antioquia, Colombia. (+574) 5145600

RESUMEN

El proceso de densificación de las ciudades, sumado al intensivo aumento del consumo de energía hace de los centros urbanos uno de los sectores de mayor impacto en el balance energético mundial. Teniendo en cuenta lo anterior, la generación de energía fotovoltaica presenta grandes ventajas ya que generación y consumo pueden tener coincidencia espacial y temporal.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el potencial de generación energética por medio de conversión fotovoltaica, de paneles instalados en las fachadas de edificaciones dentro de centros urbanos ubicados en la ciudad de Medellín, teniendo en cuenta el impacto del entorno.

Fueron analizados varios polígonos urbanos existentes y evaluado el potencial de generación de energía fotovoltaica de fachadas y cubiertas, para finalmente establecer el porcentaje de la energía consumida que podría ser generada por medio de paneles FV. Adicionalmente se presentan algunos lineamientos y prácticas recomendadas para garantizar un rendimiento óptimo de los sistemas fotovoltaicos dentro de espacios urbanos densos.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos, eficiencia energética, centros urbanos, radiación solar.

ABSTRACT

The urban densification process and increasing energy consumption make the urban environment one of the sectors with the highest impact on the world's energy balance. Taking this into account, the great advantage of photovoltaic (PV) energy conversion is the possibility of spatial and temporal coincidence of generation and consumption.

The aim of this study is to assess the energy conversion potential of PV in building facades within tropical urban contexts, considering the impact of the surrounding built environment. There were evaluated several existing urban polygons, to calculate the energy generation potential on facades and roofs, and finally establish the amount of consuming energy that could be generated by the PV system.

In addition, a series of guidelines and good ways to ensure an optimum performance of the PV systems within urban environments are presented.

Keywords: Photovoltaic Systems, Urban Zones, Solar Radiation.

1. INTRODUCCIÓN

A partir del año 2011 el mundo se convirtió en un lugar más urbano que rural, es decir, la mayor parte de sus poblaciones son ciudades o pueblos, y no campos. Teniendo en cuenta que son las ciudades, los lugares donde la demanda de energía se presenta en mayor proporción debido a las altas densidades poblacionales que presentan y a los acelerados ritmos de consumo, se hace entonces fundamental plantear estrategias que aporten a las crecientes demandas de energía que se presentan en estos espacios urbanos.

En el contexto climático tropical, el recurso solar es uno de los más abundantes, encontrándose muy por encima del promedio de radiación solar que reciben los países subtropicales. Con base en lo anterior la generación de energía fotovoltaica presenta grandes ventajas ya que generación y consumo pueden tener coincidencia espacial y temporal. Esto quiere decir que la generación energética puede lograrse en el mismo lugar y al mismo tiempo que será consumida, evitando pérdidas importantes de energía por concepto de transporte y almacenamiento (generación distribuida).

Por otra parte, en el caso de las ciudades, por su alta densificación, las edificaciones cuentan con formatos principalmente verticales y son escasas las superficies horizontales disponibles para instalar paneles fotovoltaicos (FV).

Al observar este panorama en el contexto de Medellín, Colombia (Latitud 6,25°N), se evidencia el acelerado ritmo de desarrollo de la ciudad. El asentamiento de la población en el territorio ha correspondido a una adaptación a la geografía ya que, por su condición de valle, ha ocasionado un rápido crecimiento hacia las laderas, dejando pocos suelos disponibles para construir y en consecuencia un acelerado crecimiento en altura, (ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ; UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, 2007). Esto da como resultado, que en nuestro contexto la disponibilidad de áreas para la generación de energía fotovoltaica se encuentre principalmente en las superficies verticales de las edificaciones (fachadas).

La demanda de energía para el caso de Colombia, según lo expresa la Unidad de Planeación Minero Energética (Ministerio de Minas y Energía; UPME, 2015), tiene una tendencia constante al alza. Así, entre el año 2014 y 2018 ésta aumentará de 63.964 GW/h a 91.835GW/h (43%). Además, es de resaltar en el contexto regional, la participación en el Producto Interno Bruto (PIB) del sector eléctrico: El departamento de Antioquia presentó un crecimiento del 19% entre el año 2000 al 2013, dejándolo en segundo lugar a nivel nacional. Es de fundamental importancia tener presentes las dinámicas del mercado del sector de la energía con el fin de propender por la explotación responsable de los recursos y el aumento de la producción energética.

Las ciudades que se ubican en la franja tropical, como Medellín, cuentan con mayores disponibilidades de radiación solar. Sin embargo, los mayores niveles de generación de energía y de aplicación de sistemas FV, se encuentran en los países que presentan menores disponibilidades, ubicados en las zonas subtropicales. Se realizó una comparación de la disponibilidad de radiación solar por medio de simulaciones computacionales con el plug-in DIVA (JAKUBIEC; REINHART, 2011; SOLEMMMA - ENVIRONMENTAL TOOLS TO EMPOWER DESIGN, 2013), en el programa Rhinoceros (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2008), con el fin de demostrar que en nuestro contexto el potencial de utilización de sistemas FV para generación de energía eléctrica es bastante positivo. En la figura 1 se evidencia que la ciudad de Medellín cuenta con un recurso de radiación solar más de dos veces mayor que el que se presenta en la ciudad de Berlín. Sin embargo, Alemania ganó el primer puesto en capacidad de producción fotovoltaica instalada a nivel mundial en el año 2011 y en 2014, seguido por China, Italia, Japón y EEUU, todos países subtropicales. A partir de lo anterior podemos concluir que con las condiciones disponibles en nuestro contexto es posible generar energía a partir del efecto FV de manera bastante eficiente.

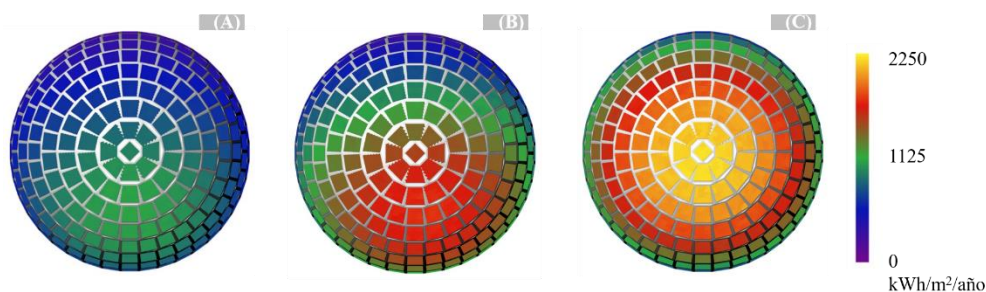


Figura 1 – Comparación de la disponibilidad de radiación solar en Berlín: 52,5°N (a), Madrid: 40,4°N (b) y Medellín: 6,25°N (c). Simulación de media esfera para evaluar todas las orientaciones e inclinaciones. Fuente propia.

“(…) el desarrollo de fuentes alternativas locales de energía que puedan sustituir por lo menos parcialmente el uso de estas fuentes (petróleo,

carbón y gas natural) en el transcurso de las próximas décadas cobra relevancia para satisfacer la demanda energética doméstica futura, a fin de no tener que ceder a una alta dependencia en la importación de estos energéticos convencionales en el largo plazo.”

(UPME, 2015)

Teniendo en cuenta lo anterior y sumado a una creciente preocupación por el medio ambiente y los efectos negativos de la explotación de fuentes convencionales de energía, se hace aún más pertinente poner en el panorama las FNCE (fuentes no convencionales de energía) en el contexto nacional. Aún se hace más evidente esta situación, cuando el país ha experimentado crisis energéticas recientemente como la presentada entre 2015 y 2016, causada por la sequía de las centrales hidroeléctricas debido al fenómeno del niño. Lo que finalmente muestra que poseemos una gran dependencia a la generación de energía hidroeléctrica (cerca del 70% de la capacidad instalada del país (UPME, 2015)), fuente que, a pesar de ser considerada no contaminante, está sujeta a los fenómenos climáticos. Por su parte, el recurso de radiación solar es bastante predecible, haciendo de la energía solar FV una fuente confiable y altamente estable. Al momento, dentro de la matriz energética colombiana, la producción de energía eléctrica por medio del efecto FV tiene una porción insignificante, sin embargo, se espera un crecimiento de este tipo de tecnologías en los próximos años. A partir de la sanción de la Ley No. 1715 de 2014 (CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA, 2014) el congreso de Colombia busca integrar las fuentes no convencionales de energía (FNCE) al sistema energético nacional. En ésta están incluidos aspectos jurídicos, legales, tributarios, de gestión, orientación de las políticas públicas e instrumentos financieros, entre otros, en función de apoyar y dirigir los actores públicos o privados que se encuentran implementado estas energías alternativas. Esto es un hecho que abre las posibilidades para que dichas tecnologías sean eficazmente integradas a la matriz energética nacional incentivando a la comunidad a invertir y a la academia a ampliar las investigaciones que respalden su uso. Además, es de resaltar que por medio del Ministerio de Hacienda y Crédito público del país también se está fomentando la investigación y desarrollo de las FNCE, donde se otorgan subvenciones y otras ayudas.

Con la realización de esta investigación se apunta además a continuar formando una conciencia social y ambiental más acorde con la realidad ambiental que vivimos actualmente. Es un trabajo que planteará estrategias prácticas aplicables a centros urbanos existentes para que éstos aumenten su eficiencia energética y de paso actúen como sensibilizadores e instrumentos de educación ambiental.

2. OBJETIVO

Esta investigación tiene el fin de evaluar el potencial de generación de electricidad a través de sistemas fotovoltaicos instalados en las fachadas de edificaciones en diversos polígonos urbanos de la ciudad de Medellín, teniendo en cuenta el impacto del entorno construido sobre la disponibilidad de radiación solar.

3. MÉTODO

El diseño metodológico de esta investigación está compuesto por cuatro fases que son: documental, reconocimiento, simulación y resultados.

3.1. Fase documental

Inicialmente se realizó un levantamiento de los conceptos técnicos y comerciales de las tecnologías fotovoltaicas y su implementación en la ciudad de Medellín. Se hizo también una revisión de la norma vigente concerniente a la generación de energías renovables y sus posibles beneficios tributarios.

3.2. Fase de reconocimiento

En esta fase se realizó el levantamiento de los polígonos urbanos más representativos de la ciudad de Medellín para determinar cuáles debían ser parte de la muestra a la que se le realizarían las evaluaciones de incursión solar y disponibilidad de radiación solar. La selección de los polígonos respondió a aspectos formales y de configuración que fueran representativos de los contextos urbanos en general.

3.2.1 Selección de polígonos

Para la selección de los polígonos se consideró que la volumetría de las edificaciones debía tener formato predominantemente vertical, además que la fachada de mayor dimensión en lo posible debía de estar en

dirección Oriente-Occidente, para permitir un mayor despliegue del sistema fotovoltaico en fachada. Fueron elegidos para el estudio seis polígonos en diferentes áreas e implantados en distintas topografías (ver figura 2).

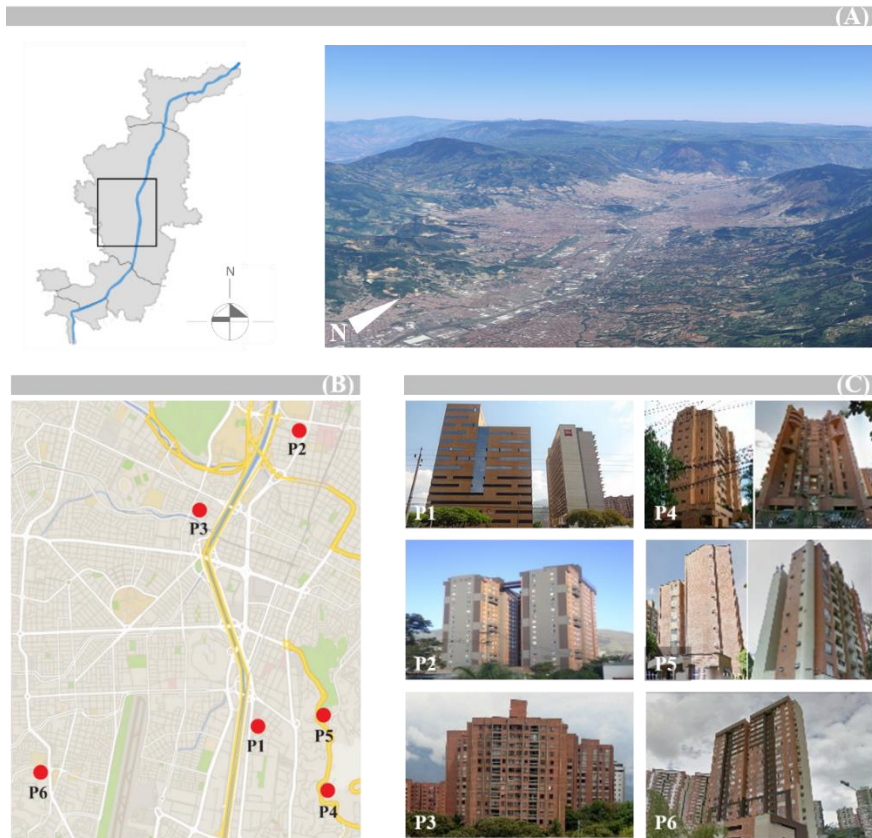


Figura 2 – Localización de polígonos analizados. (a) Área metropolitana del Valle de Aburrá, (b) Encuadre y (c) referencia fotográfica de los polígonos estudiados. Fuentes: Programa Satelital Google Earth. Street View.

Teniendo en cuenta la condición física del territorio en Medellín, se escogieron 3 polígonos en una topografía plana, y 3 en una topografía en ladera, con el fin de verificar la hipótesis de que era posible que los polígonos en ladera tuvieran una localización privilegiada con respecto a la disponibilidad de radiación solar, ya que cada edificio estaría emplazado en un nivel topográfico distinto, lo que disminuiría la posibilidad de obstrucción de radiación solar entre éstos. También se determinó que el número de edificios con el que debía contar cada polígono era de 12.

3.2.2 Levantamiento de los polígonos

Para obtener las dimensiones de los edificios de cada polígono se procedió a utilizar el programa satelital Google Earth, en el cual se tomaron todas las medidas necesarias (ancho, profundidad y altura); de igual manera se obtuvieron los datos topográficos de los polígonos. Esta información fue utilizada para construir los modelos 3d de cada sitio. Es importante mencionar que la construcción de los modelos fue de una precisión básica, lo que implicó la ausencia de ventanas u otras superficies no opacas (donde no se instalaría el sistema FV). Para la identificación de estas áreas en fachada se utilizó el programa AutoCAD donde se realizó minuciosamente la medición y conteo.

3.3. Fase de reconocimiento

En esta fase se realizó la construcción de los modelos tridimensionales dentro del programa Rhinoceros. Estos modelos fueron la base para las simulaciones computacionales que evaluaron la disponibilidad de radiación solar en cada una de las superficies de las edificaciones.

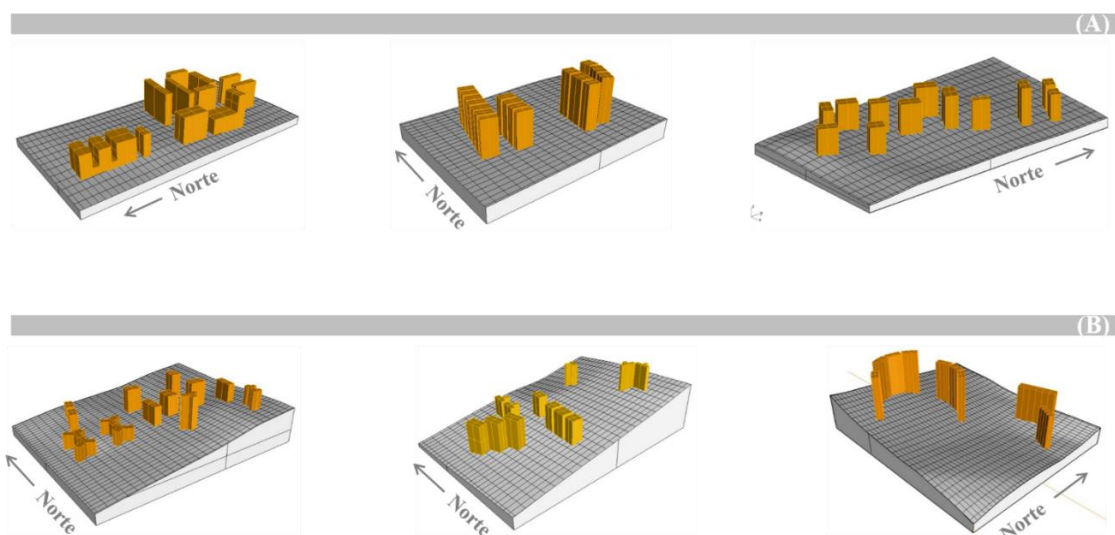


Figura 3 – Modelos de polígonos analizados; polígonos en planicie (a), polígonos en ladera (b). Las orientaciones presentadas corresponden con las reales encontradas en los polígonos. Fuente propia.

Dichas simulaciones se hicieron con base en un archivo climático que contiene la recopilación de diversos parámetros climáticos hora a hora, durante un año completo y se corrieron por medio del Plug-in DIVA. Este software arrojó como resultado planillas electrónicas dónde se presentan las cantidades de radiación solar disponibles anualmente, en cada uno de los nodos de las superficies del modelo.

Era importante que cada polígono tuviese la topografía más aproximada posible, donde se evidenciara el emplazamiento de los edificios. Para lograr esto se utilizó el Plug-in LANDS DESIGN (ASUNI, 2017), para el programa Rhinoceros, el cual a partir de una imagen referencia del programa Google Earth, crea un terreno con la topografía del lugar. Luego de obtener esta base se procedió a ubicar cada edificio en su lugar correspondiente. (Ver figura 3).

3.4. Fase de resultados

Finalmente, se realizaron los cálculos de la generación de energía de cada superficie y se hicieron comparaciones entre los consumos de las edificaciones y sus aportes energéticos por medio de la generación FV. Se eligió un sistema FV de 280W de potencia, que estuviera comercialmente disponible en la ciudad. Así, fue posible establecer el nivel de eficiencia que presenta cada polígono, al igual que el aporte individual de las fachadas en las cuatro orientaciones principales. Para llevar a cabo este proceso, se utilizaron 4 rangos de disponibilidad de radiación solar (RENDÓN, 2013), entre los cuales se clasifica el nivel de disponibilidad de radiación de cada nodo (ver tabla 1). Cada rango responde a un porcentaje de la máxima disponibilidad de radiación solar para la ciudad de Medellín, que es 2250 kWh/año.

Tabla 1–Tabla de rangos de disponibilidad de radiación solar. Fuente propia.

Insuficiente	Bajo	Medio	Alto
< 40%	40% - 60%	60% - 80%	> 80%

3.4.1 Cálculo de generación de energía

Basados en la investigación de (ZOMER, 2010), se utilizó la siguiente ecuación para realizar los cálculos de generación de energía:

$$E = G \times r \times P_{cc} \quad \text{Equação 1}$$

Donde:

E es la energía generada en kWh/año.

G es la radiación anual recibida en el plano del panel fotovoltaico (kWh/m²), dividida por la irradiancia de referencia de 1 kW/m², expresada en número de horas (h).

r es el coeficiente de rendimiento. Este coeficiente corresponde a todas las pérdidas que ocurren en un sistema FV (generación, conversión, transporte, etc.) Se adoptó 0,80 debido a que es un valor comúnmente recomendado en la literatura (RÜTHER, 2004; ZOMER, 2010).

Pcc es la corriente continua de alimentación del sistema (kW).

Finalmente, se generaron los lineamientos y prácticas recomendadas para la aplicación eficiente de sistemas fotovoltaicos dentro de los polígonos evaluados, o bien, en cualquier edificación que esté inserida en un núcleo urbano en la ciudad de Medellín.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Después de cumplir con las fases documental, de reconocimiento y de simulación, fueron realizadas comparaciones cuantitativas entre los diferentes polígonos y fue observado el comportamiento individual de cada uno.

4.1. Generación vs. Consumo

Los resultados sobre la cantidad de energía que cada uno de los polígonos generó, se presentó en relación al consumo energético del mismo, con el objetivo de tener una información comparable y relacionable entre sí, teniendo en cuenta que los polígonos cuentan con diferentes condiciones y número de edificaciones.

Para calcular el consumo de energía se contabilizó el número de viviendas en cada edificio de cada polígono y se multiplicó por el consumo mensual promedio que presentan las viviendas en la ciudad de Medellín según su estrato (establecido para cada polígono previamente). En la siguiente tabla se presenta la información principal de cada polígono.

Tabla 2–Tabla de información técnica sobre los polígonos.

	Polígono 1	Polígono 2	Polígono 3	Polígono 4	Polígono 5	Polígono 6
Estrato	5	3	5	6	6	3
# de viviendas	3735	1156	1078	695	483	1541
Consumo vivienda x mes [kWh/mes]	217	165	217	319	319	165
Consumo polígono x año [kWh/año]	9.726.461	2.288.385	2.805.940	2.658.929	1.848.924	3.051.180
Área Fachadas + Cubierta [m²]	109.677	29.571	59.516	48.242	31.723	43.807
Área F+C x vivienda [m²]	29,36	25,59	55,23	69,45	65,68	28,43
Área Fachadas [m²]	89.776	25.432	51.972	40.175	28.035	38.416
Área F x vivienda [m²]	24,04	22,00	48,23	57,84	58,04	24,93

El polígono que cuenta con la mayor área potencial para instalaciones FV teniendo en cuenta Fachadas y Cubiertas (F+C) fue el Polígono 1 y el que presentó la menor área fue el Polígono 2, siendo un 26% del primero. Así mismo cuando sólo se computan las áreas de las Fachadas, el polígono con mayor disponibilidad de superficies es el número 1 y el que presenta menor área es el número 2. Éstos últimos datos representan el 81,8% y el 86% de las áreas F+C respectivamente.

Ya cuando se calcula el área de superficies disponibles para instalación FV con la que cuenta cada residencia del polígono (área total disponible/número de residencias), los resultados varían: En relación a las áreas F+C, el caso que presenta mayor área por residencia es el Polígono 4 y el que presenta la menor relación es el Polígono 2. Por otro lado, cuando se tienen en cuenta las áreas únicamente de fachadas (F), el Polígono 5 y el Polígono 2 tienen la mayor y la menos cantidad, respectivamente.

En la figura 4, se presentan las relaciones Generación/Consumo de todos los polígonos discriminados por orientación. El mejor desempeño general lo obtuvo el Polígono 3, seguido del P4, P2, y P6 en la situación F+C y en la situación F. Los peores desempeños para la generación de energía en cubiertas y fachadas los obtuvieron P5 y P1, por el contrario, en el caso de generar energía solo en fachadas, se invierten los peores desempeños. En el 33% de los casos la generación de energía se da únicamente en las fachadas Oriente – Occidente, otro 33% representa los casos en los que la generación se da casi exclusivamente en las fachadas Oriente y Occidente (para un total de 66% en que la mayor generación se presenta en dichas orientaciones), con una mínima contribución de la fachada Sur; un solo Polígono presenta generación de energía en las fachadas Oriente, Occidente y Sur (siendo la sur una tercera parte de las otras dos) y finalmente el polígono restante tiene un comportamiento singular generando su energía en las fachadas norte y sur (Polígono 1). Es

importante anotar que en todos los casos la generación de energía FV en las superficies verticales supe al menos un 22% del consumo total de energía del polígono, lo que supondría un ahorro mensual significativo en el cobro de energía. De igual forma, el caso que presentó mejores resultados lograría generar el 88% de la energía total que consume, siendo necesario únicamente comprar un 12% de la energía que se consume a la red eléctrica pública.

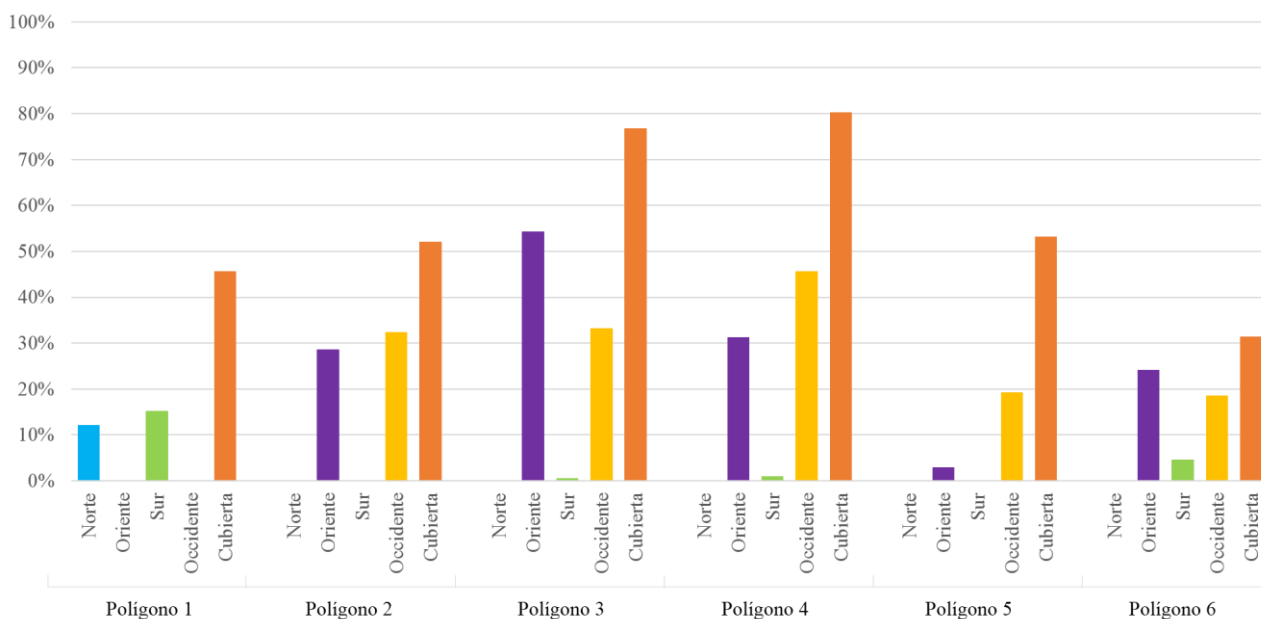


Figura 4 – Relación Generación/Consumo de todos los polígonos, discriminado por la orientación de sus fachadas.

4.2. Influencia de los parámetros arquitectónicos

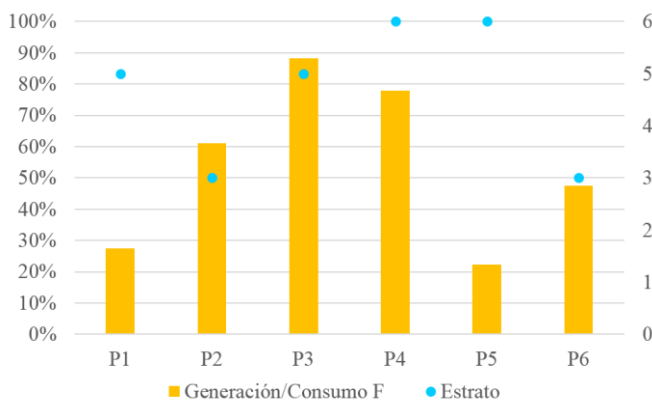


Figura 5 –Comparación entre la relación Generación/Consumo y el estrato socioeconómico de cada polígono.

A continuación, son confrontados algunos parámetros arquitectónicos con la relación Generación/Consumo de los diferentes polígonos, con el fin de establecer la influencia de éstos en la generación de energía FV en las fachadas de las edificaciones.

En la figura 5 puede observarse que los polígonos que presentan las mejores relaciones entre generación y consumo están localizados en los estratos 5, 6 y 3 respectivamente. Adicionalmente, el caso que contó con el peor desempeño está localizado en estrato 6. Esto indica que no está estrechamente relacionado el nivel socioeconómico del Polígono con el potencial que éste tenga para suplir su demanda de energía por medio de la generación FV.

Con respecto a la influencia que tiene la cantidad de viviendas presentes en el polígono, en su eficiencia para cubrir la demanda de energía, en la figura 6-a puede observarse que el polígono que tiene la mayor cantidad de viviendas cuenta con un potencial de generación muy bajo, 20% por encima del peor caso. Ya el polígono 5, que tiene la menor cantidad de viviendas, presenta el peor desempeño energético. Es importante anotar que, si bien la cantidad de viviendas dentro del polígono afecta directamente su eficiencia para generar energía, visto que aumentará su demanda de energía, no es un parámetro que tenga una relación directa con la proporción Generación/Consumo pues empiezan a pesar más aspectos como la cantidad de área disponible para generación FV en función de la cantidad de viviendas, (Figura 6-b), sin embargo, presenta una relación inversamente proporcional. Puede observarse que la tendencia de dicha relación es a ser directamente

proporcional, sin embargo, es evidente que hay otros factores que afectan la capacidad de los polígonos para generar su propia energía.

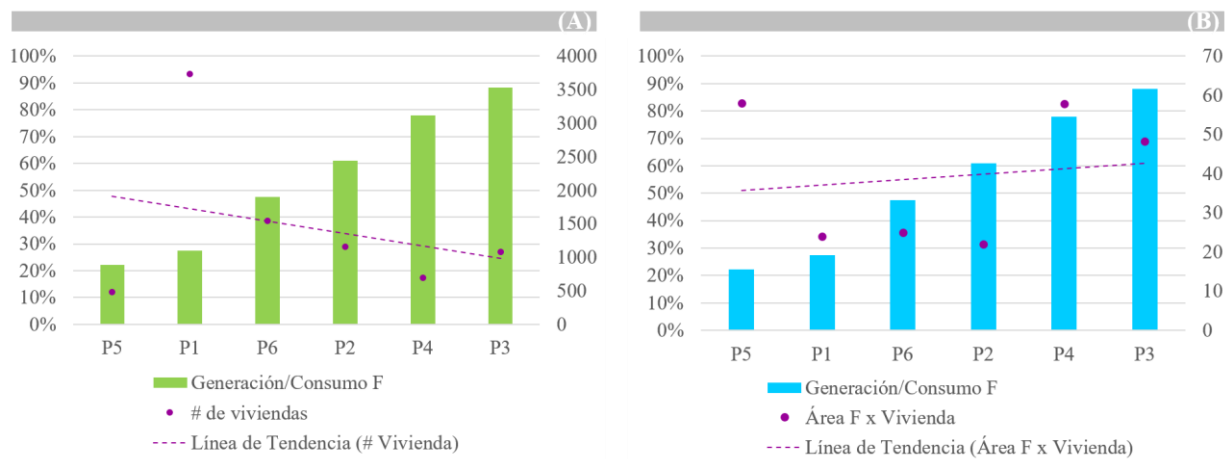


Figura 6 – a. Comparación entre la relación Generación/Consumo y la cantidad de viviendas de cada polígono. b. Comparación entre la relación Generación/Consumo y el área disponible para conversión FV en función del número de viviendas.

4.3. Influencia de los parámetros urbanos

Para establecer la influencia que tienen los parámetros urbanos sobre la capacidad de generación FV en las superficies verticales de los diferentes polígonos, se realizaron comparaciones entre los porcentajes de Generación/Consumo observando en cada caso cuales fueron las orientaciones de las fachadas principales (más grandes) y los ángulos de bloqueo que le proporcionan los edificios vecinos. El ángulo de bloqueo es una opción efectiva para calcular la cantidad de radiación solar que deja de llegar a las fachadas de la edificación evaluada, gracias a las edificaciones adyacentes, teniendo en cuenta su altura y distancia. Éste se calcula como el ángulo formado en la base de la edificación, entre el plano del terreno y una línea trazada desde allí hasta la parte más alta de la edificación vecina (LEDER; PEREIRA, 2009).

Las fachadas que obtuvieron el mejor desempeño fueron las fachadas orientales de P3 con una relación Generación/Consumo de 54% y un ángulo de bloqueo de 18,9°. Las siguen las fachadas occidentales de P4 y P3 con un 46% y 33% de atendimento de la demanda y 26,2° y 30,2° de ángulos de bloqueo, respectivamente. En todos estos casos la fachada que presenta el mejor desempeño coincide con la orientación mayoritaria de las fachadas del polígono, (Figura 7).

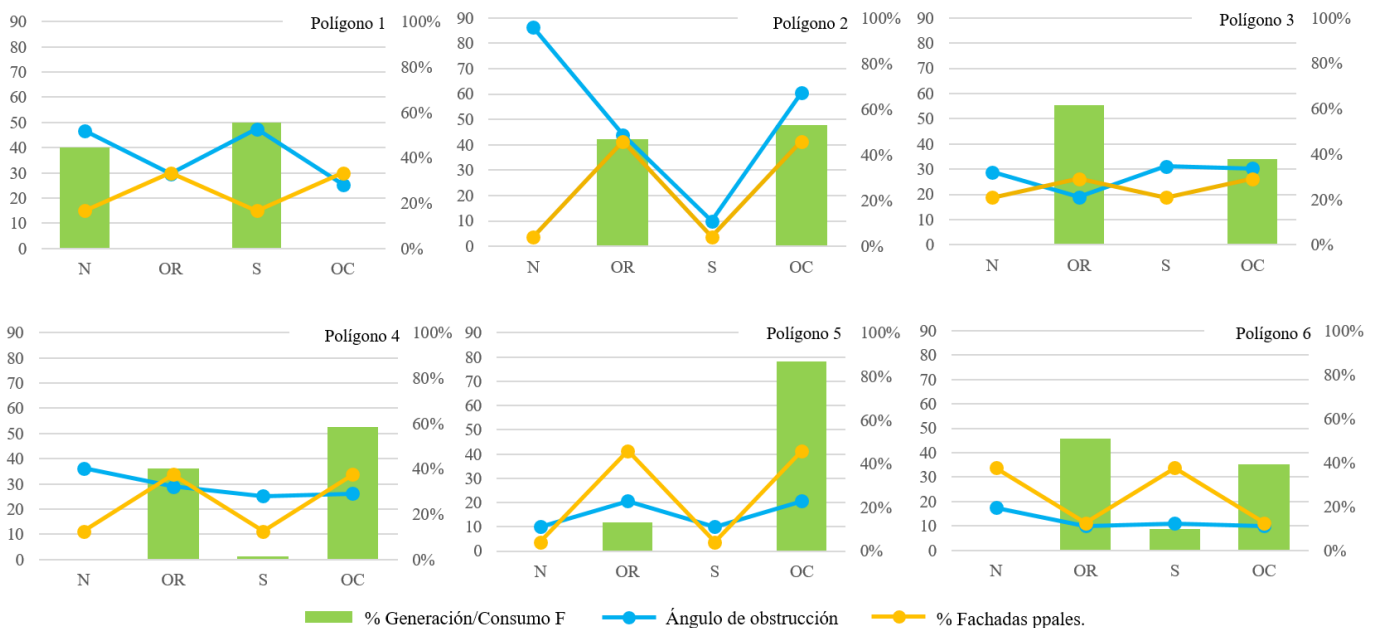


Figura 7. Comparación entre la relación Generación/Consumo, la orientación de las fachadas principales y los ángulos de obstrucción en las cuatro orientaciones principales, para los diferentes polígonos.

Únicamente el polígono 1 presenta generación de energía en las fachadas Norte y Sur, incluso teniendo en cuenta que la mayor parte de sus fachadas principales están orientadas hacia Oriente y Occidente. En proporción al desempeño general del polígono, en su gran mayoría las contribuciones en la relación Generación/Consumo las hacen las fachadas orientadas hacia Oriente y Occidente con proporciones similares, en el polígono 6 hay una contribución apreciable de las fachadas Sur (10%) y el en polígono 5 se presenta una contribución mucho más representativa de las fachadas orientadas al Occidente que al Oriente, con 87% y 13%, respectivamente.

Solo en el polígono 2, los ángulos de bloqueo fueron mayores a 50°, presentando en las fachadas Norte bloqueos cercanos a los 90°, lo que se refleja en el hecho de que en estas fachadas no se presenta ninguna generación de energía. Ya en las fachadas orientadas al Occidente, a pesar de que se presentan ángulos de bloqueo de 70° aproximadamente, son las fachadas que aportan el 53,2% de la generación del polígono. En los demás polígonos no se registran ángulos de bloqueo superiores a 50° y el promedio está cercano a 21°.

5. CONCLUSIONES

Cuando el sistema está planteado para estratos altos, se espera una disminución en la eficiencia del mismo gracias al alto consumo energético que presentan, incluso teniendo en cuenta que el área de superficies verticales disponibles para cada vivienda es mayor, pues hay menos viviendas por cada edificación.

La relación Generación/Consumo es sensible e inversamente proporcional, a la cantidad de viviendas de cada edificación, pues a medida que ésta aumenta, el consumo del conjunto también lo hace y esto genera que la energía FV supla una porción menor de la demanda.

A pesar de lo anterior, el consumo de edificaciones con estratos altos resulta muy superior al de edificaciones con estratos más bajos, de lo que se puede concluir que el parámetro de consumo energético pesa más en la relación Generación/Consumo, que la cantidad de viviendas por edificación.

Una forma eficaz de evaluar el nivel de eficiencia esperado de un sistema de generación FV en fachadas urbanas, es calcular el área de superficies verticales correspondiente a cada vivienda, pues resulta evidente que hay una relación estrecha entre este parámetro y la relación Generación/Consumo, siendo directamente proporcionales. Es, entre los factores arquitectónicos, el que afecta en mayor medida el potencial de generación FV.

Para el caso específico de la ciudad de Medellín las orientaciones de las fachadas principales son Oriente y Occidente en mayor medida, lo que puede parecer inconveniente desde el punto de vista del asoleamiento de las viviendas pues son estas orientaciones las que presentan mayores incursiones solares, sin embargo, esto puede explicarse como el afán de diseñadores y arquitectos por garantizar visuales privilegiadas del Valle de Aburrá. Así mismo, cabe resaltar que no hay una diferenciación de generación FV entre las fachadas orientales y las occidentales, lo que sugiere que puede ser más beneficioso situar grandes áreas de fachada hacia el oriente, posibilitando la generación de energía y aprovechando la radiación solar de las mañanas.

Cuando se evalúan los ángulos de obstrucción, se concluye que su influencia es mayor cuando se trata de fachadas orientadas a Oriente y Occidente. Por otro lado, cuando las fachadas están situadas en otras orientaciones el ángulo de obstrucción tiene muy poco peso sobre el potencial de generación de energía. En los resultados del presente trabajo no se observó ninguna diferencia sustancial entre la generación de los polígonos en ladera y los polígonos localizados en terreno plano, lo que sugiere que hay otros aspectos urbanos que afectan en mayor proporción que éste.

La generación de energía en los polígonos puede potencialmente duplicarse si se adecúa la totalidad del área de las cubiertas para la instalación de sistemas FV adicional al de las fachadas, garantizando que ningún elemento va a proyectar sombra sobre él (tanques, sobre recorrido del elevador, etc). Así mismo, se podría usar esta área para otros tipos de aprovechamiento solar como calentamiento de agua.

A continuación, se presenta un resumen gráfico de las conclusiones, donde se presentan los diferentes parámetros estudiados y su relación con el potencial de generación FV.

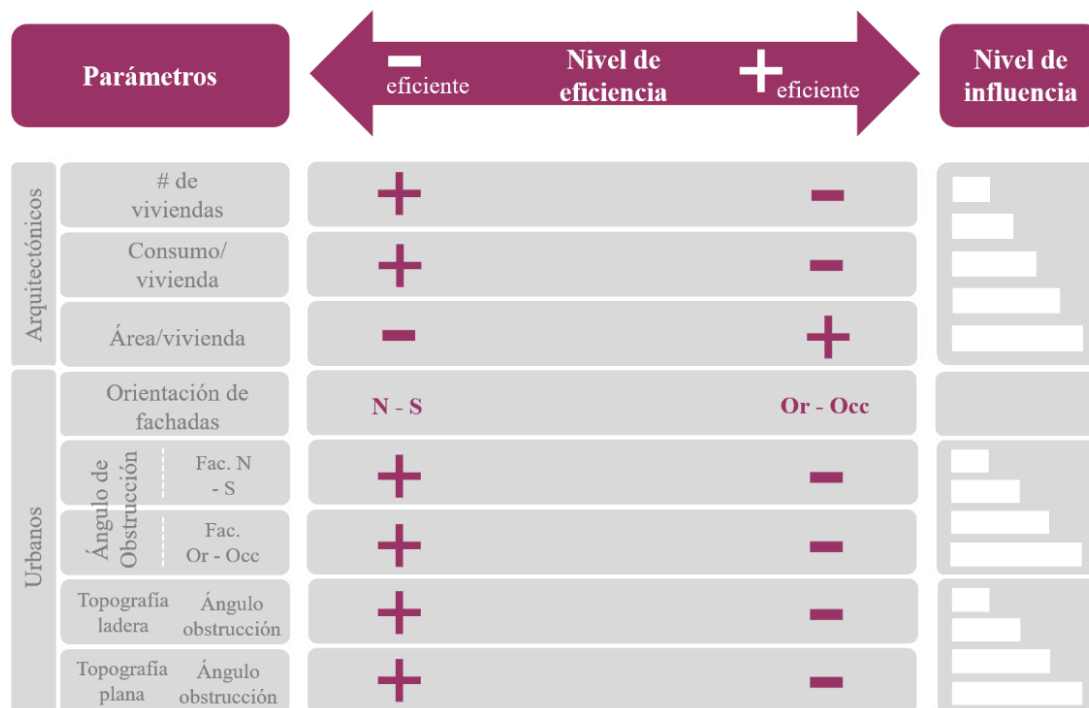


Figura 8– Resumen gráfico de los diferentes parámetros estudiados y su influencia en el potencial de generación FV en fachadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ; UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA. **Estudio de la Forma y el Crecimiento Urbano de la Región Metropolitana**. Medellín: Artes y Letras Ltda., 2007.
- ASUNI. Consultado en: Mayo 2017. Disponible en: <<http://www.asuni.es/portfolio/lands-rhino/>>
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. **Ley N° 1715 del 13 de mayo de 2014** Colombia, 2014. Disponible en: <http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf>
- JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. **DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D , Daysim and Energyplus. Building Simulation**, p. 14-16, 2011.
- LEDER, S.; PEREIRA, F. O. **Padrões de Ocupação Urbana e disponibilidade da Luz Natural**. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Natal, Brasil: 2009
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA; UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. **Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia**. Disponible en: <<http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/UPME Proyección EE Noviembre 2014.pdf>>.
- RENDÓN, L. **Influência dos parâmetros de construção urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas**. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Univesidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhinoceros 4.0 User's Guide**. 2008.
- RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianopolis:UFSC. LABSO, 2004.
- SOLEMMA - ENVIRONMENTAL TOOLS TO EMPOWER DESIGN. Consultado en: Mayo 2017. Disponible en: <<http://www.solemma.net/>>.
- UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. **Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia**. Medellín. 2015
- ZOMER, C. **Geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em meio urbano e conectada à rede elétrica**. 2010. Tesis de Maestría. Departamento da Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.