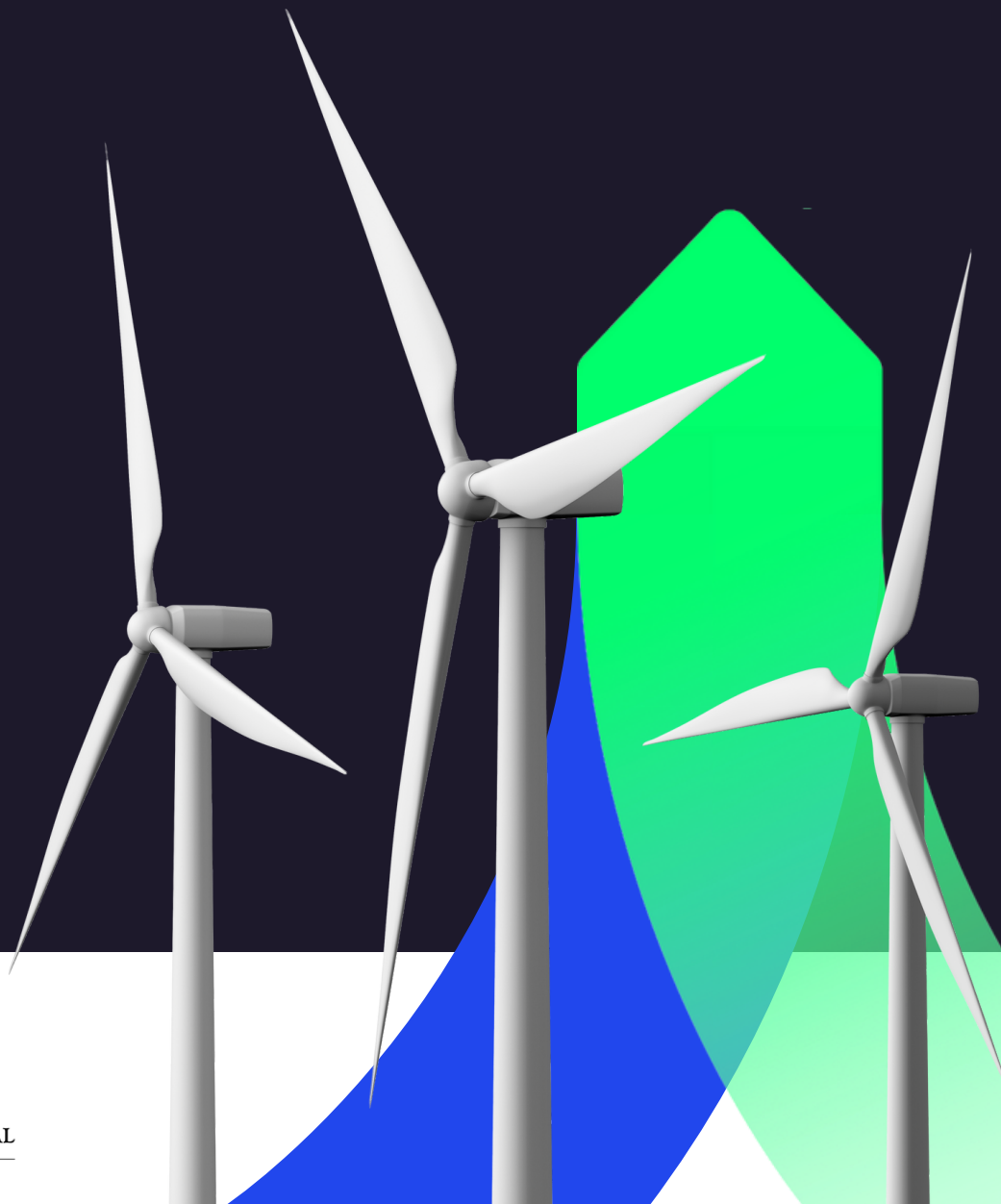


# Beneficios Económicos de las Tarifas Horarias para los Usuarios Finales

Apoyo al Despliegue de Tecnologías de Redes Inteligentes en Colombia

Marzo 2022



Supported by:

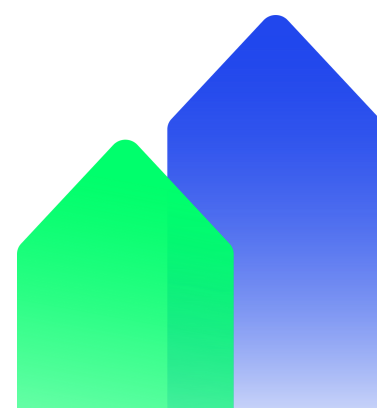


# Contenido

<b>Resumen ejecutivo</b>	<b>iii</b>
<b>Mensajes clave</b>	<b>v</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de acrónimos</b>	<b>x</b>
<b>1. Beneficios económicos</b>	<b>12</b>
1.1 Introducción	12
1.2 Beneficios y captura de beneficios	12
1.3 Tarifas y comportamiento de la demanda de usuarios finales	15
<b>2. Impactos distributivos de las tarifas horarias</b>	<b>17</b>
2.1 Introducción	17
2.2 Enfoque	19
2.3 Sector residencial	19
2.4 Sectores comercial e industrial	28
<b>3. Impacto en la adopción de tecnologías</b>	<b>30</b>
3.1 Escenario 1: Paneles solares	30
3.2 Escenario 2: Paneles solares y baterías	34
3.3 Escenario 3: Vehículos eléctricos	37
3.4 Análisis de factibilidad económica	40
<b>4. Impacto del cambio de comportamiento</b>	<b>46</b>
4.1 Cambios en la curva de demanda	47
4.2 Análisis de sensibilidad	48
4.3 Análisis agregado del mejor escenario	49



<b>5. Aspectos relevantes</b>	<b>50</b>
<b>5.1 Subsidios al consumo y subsidios productivos</b>	<b>50</b>
<b>5.2 Subsidios y adopción de tecnologías</b>	<b>51</b>
<b>5.3 Potenciales pilotos</b>	<b>51</b>
<b>6 . Conclusiones</b>	<b>54</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>56</b>
<b>A. Marco conceptual</b>	<b>56</b>
<b>A.1. Estructura de costos: fijo y variable</b>	<b>56</b>
<b>A.2. Distorsiones en el mercado</b>	<b>56</b>
<b>A.3. Tarifas y eficiencia económica</b>	<b>57</b>
<b>A.4. Incentivos vía precio y cambio conductual de las y los usuarios</b>	<b>58</b>
<b>B. Contexto colombiano</b>	<b>59</b>
<b>B.1. Estructura tarifaria</b>	<b>59</b>
<b>B.2. Tarifas actuales</b>	<b>59</b>
<b>B.3. Tarifas horarias disponibles</b>	<b>63</b>
<b>B.4. Generación distribuida y balance neto</b>	<b>66</b>
<b>C. Descripción del modelo tecno-económico</b>	<b>67</b>
<b>C.1. Ubicaciones y perfiles energéticos</b>	<b>67</b>
<b>C.2. Diseño de las tarifas horarias</b>	<b>72</b>
<b>C.3. Parámetros tecnológicos</b>	<b>72</b>
<b>C.4 Parámetros financieros</b>	<b>75</b>
<b>Referencias</b>	<b>76</b>



# Resumen ejecutivo

La evaluación de la implementación de tarifas horarias, en complemento al sistema tarifario actual basado en una tarifa monomía en Colombia, requiere de indicadores que den cuenta de la viabilidad económica para la toma de decisiones sobre su aplicación. Uno de los indicadores más relevantes son los costos y beneficios económicos, es decir el impacto económico, para las y los usuarios asociados a su implementación.

Los beneficios económicos netos de la implementación de una tarifa horaria dependen de múltiples variables como, por ejemplo, el perfil energético de usuarios finales, su ubicación, el clima, el tipo de sector de demanda, entre otros. Esta multiplicidad de factores deben considerarse por lo tanto para el diseño de tarifas eficientes.

El impacto económico no es homogéneo para todos los tipos de usuarios, por lo que los efectos distributivos deben tomarse en cuenta a fin de minimizar efectos negativos. Este aspecto es particularmente relevante en el sector residencial, el cual se encuentra dividido por estratos socioeconómicos. El análisis del impacto diferenciado por estrato es importante por razones sociales y económicas; en particular, el diseño tarifario debería estar alineado con políticas públicas progresivas, es decir, con impactos positivos mayores para los estratos de menores ingresos.

Al igual que en el sector residencial, la estimación del impacto en los sectores comercial e industrial es importante ya que tiene un efecto importante en la competitividad de las empresas. La identificación de aquellas variables con mayores repercusiones en los beneficios económicos es un aspecto igualmente crucial para considerarse en el diseño de tarifas eficientes.

Este reporte tiene el objetivo de estimar los beneficios económicos para las y los usuarios por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía. Para ello, se analizaron las diversas condiciones en que tarifas horarias tipo pudieran generar beneficios en demandas representativas, obtenidas por medio de un proceso de caracterización de la demanda realizado a partir de una muestra de medidores inteligentes instalados a la fecha en Colombia.

En el [capítulo 1](#) se discute el origen de estos beneficios económicos a partir de la implementación de una tarifa horaria, la cual, desde un punto de vista económico, resulta ser más eficiente que una tarifa monomía al capturar las fluctuaciones del precio de la energía durante el día. Además, se discute brevemente cómo consumidores, el Estado o el sistema eléctrico pueden capturar estos beneficios, así como las implicaciones y oportunidades que tendría cada uno de estos esquemas.



En el [capítulo 2](#) se discuten los impactos distributivos de las tarifas horarias. Para el sector residencial se analizan los impactos distributivos por estrato que tendría la aplicación de tres distintos esquemas tarifarios. Para ello se seleccionaron tres distintos perfiles energéticos representativos relacionados con el clima y algunas otras variables relevantes. La segunda parte de este capítulo discute los impactos económicos de distintos perfiles energéticos en los sectores comercial e industrial de los tres esquemas tarifarios propuestos.

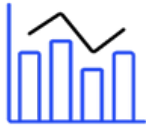
En el [capítulo 3](#) se abordan tres escenarios de adopción de tecnologías bajas en carbono y sus implicaciones, en conjunto con la adopción de una tarifa horaria. El objetivo es la identificación de un escenario que podría impulsar la mayor generación de beneficios económicos, a la vez que tecnologías de bajas emisiones se implementan. Estos escenarios demuestran que la combinación de paneles solares y baterías pueden generar beneficios económicos relevantes, en conjunto con la aplicación de tarifas horarias, bajo ciertas condiciones.

El [capítulo 4](#) se enfoca en el análisis de los cambios de comportamiento del usuario final incentivados por las señales de precio provistas por una tarifa horaria. Aun cuando el caso de referencia asume que no hay cambios en los patrones de consumo horario, se observó que, bajo ciertas condiciones, se generaban beneficios económicos relevantes. En este sentido, se discuten las implicaciones de un esquema tarifario con señales de precio adecuadas para que el consumo de energía se desplace desde periodos de precios altos energía a periodos con precios menores, ocasionando con ello mayores beneficios económicos.

Finalmente, en el [capítulo 5](#) se discuten algunos temas relevantes para el diseño tarifario, en particular, para el caso residencial se abordan temas de cómo hacer eficiente el sistema de subsidios para que, al mismo tiempo, se generen mayores beneficios para las y los usuarios finales, se disminuya la carga para las finanzas públicas en el largo plazo y se impulse la adopción de tecnologías limpias. Además, se proponen algunos criterios importantes para poder seleccionar algún potencial piloto para la aplicación de una tarifa horaria.



# Mensajes clave



Los medidores inteligentes instalados en Colombia han permitido caracterizar la demanda de usuarios finales por sector, altura, clima, entre otras variables.



Los medidores inteligentes y la implementación de tarifas horarias tienen el potencial de generar importantes beneficios económicos a las y los consumidores.



En términos absolutos, los tipos de usuarios que más pueden ahorrar con una tarifa horaria son usuarios con tarifas más altas, que son aquellos que contribuyen a los subsidios que se entregan a los estratos de menores ingresos.



En el sector residencial, en términos porcentuales, los beneficios económicos por la aplicación de una tarifa horaria a usuarios con un mismo perfil energético son constantes, independientemente de su estrato socioeconómico.



Si la tarifa horaria genera beneficios, los estratos de menores ingresos son los más beneficiados cuando se compara el ahorro relativo a su ingreso.



El monto de los beneficios económicos generado por la aplicación de las tarifas horarias analizadas es independiente de la utilización de paneles solares.



Las tarifas horarias estudiadas combinadas con la utilización de sistemas de paneles solares con baterías permiten generar beneficios económicos adicionales a los obtenidos con una tarifa monomía.



El uso de tarifas horarias para realizar la carga de vehículos eléctricos de forma inteligente, es decir en base a las señales de precio, pueden generar ahorros significativos para los usuarios de estos vehículos.



En el caso de las tarifas horarias estudiadas, el cambio de comportamiento en la demanda puede generar entre un 2% y 3% de ahorro adicional, cuando el diferencial de precio de la tarifa es por sobre 25% del precio de referencia.

# Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Representación de dos esquemas tarifarios y la posible distribución de los beneficios.....	<b>13</b>
<b>Figura 2.</b> Representación esquemática del cambio en el consumo típico como respuesta a señales de precio.....	<b>15</b>
<b>Figura 3.</b> Diferencia entre un esquema tarifario con tarifa monomía promedio y una con diferenciación horaria. Fuente: elaboración propia.....	<b>17</b>
<b>Figura 4.</b> Variables que impactan en los beneficios económicos de variables.....	<b>19</b>
<b>Figura 5.</b> Porcentaje de beneficios económicos generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía en el sector residencial bajo distintos esquemas tarifarios y perfiles energéticos .....	<b>20</b>
<b>Figura 6.</b> Beneficios económicos promedio generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía en el sector residencial de acuerdo al perfil energético.....	<b>23</b>
<b>Figura 7.</b> Beneficios económicos (ahorros promedio) anuales por usuario para cada estrato en el sector residencial bajo el escenario de referencia de las tarifas Doble Tipo 1, Doble Tipo 2 y Triple.....	<b>24</b>
<b>Figura 8.</b> Impacto porcentual y monetario por la aplicación de una tarifa horaria Doble Tipo 2 desagregado por estrato.....	<b>25</b>
<b>Figura 9.</b> Multiplicador de la tarifa de referencia para cada estrato socioeconómico.....	<b>25</b>
<b>Figura 10.</b> Beneficios económicos (%) mensuales por usuario para cada estrato en el sector residencial bajo el escenario de referencia en relación con el ingreso promedio por estrato.....	<b>26</b>
<b>Figura 11.</b> Porcentaje de beneficios económicos generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía en el sector Comercial e Industrial bajo distintos esquemas tarifarios y perfiles energéticos.....	<b>28</b>
<b>Figura 12.</b> Promedio horario anual de la radiación solar para tres ciudades.....	<b>30</b>
<b>Figura 13.</b> Beneficios económicos con paneles solares, perfiles energéticos del sector residencial.....	<b>31</b>
<b>Figura 14.</b> Beneficios económicos con paneles solares, perfiles energéticos del sector comercial e industrial.....	<b>31</b>

# Índice de Figuras

<b>Figura 15.</b> Comparativa escenario base vs escenario con paneles solares, ejemplo 1.....	<b>32</b>
<b>Figura 16.</b> Comparativa escenario base vs escenario con paneles solares, ejemplo 2.....	<b>32</b>
<b>Figura 17.</b> Porcentaje de ahorros con paneles solares y baterías por sector al implementar tarifas horarias.....	<b>34</b>
<b>Figura 18.</b> Comparación de costos y beneficios en diferentes escenarios.....	<b>35</b>
<b>Figura 19.</b> Comparación de costos por tipo de tarifa y escenarios uso de la demanda base industrial, NR5.....	<b>35</b>
<b>Figura 20.</b> Comparación de costos por tipo de tarifa y escenarios uso de la demanda base industrial, NR8.....	<b>36</b>
<b>Figura 21.</b> Perfiles de carga de la flota vehicular (5 vehículos) bajo diferentes tarifas.....	<b>38</b>
<b>Figura 22.</b> Costos de carga diario entre los escenarios de carga estándar y los escenarios de carga inteligente.....	<b>39</b>
<b>Figura 23.</b> Variables del análisis de factibilidad.....	<b>41</b>
<b>Figura 24.</b> Valor presente neto (VPN) de un sistema fotovoltaico de 2.4 kW a una tasa de descuento de 9%.....	<b>41</b>
<b>Figura 25.</b> Tiempo de recuperación de la inversión simple para un sistema fotovoltaico de 2.4 kW.....	<b>41</b>
<b>Figura 26.</b> Tasa interna de retorno para un sistema fotovoltaico de 2.6 kW.....	<b>42</b>
<b>Figura 27.</b> Valor presente neto para un sistema fotovoltaico con baterías .....	<b>43</b>
<b>Figura 28.</b> Tiempo de recuperación de la inversión simple para un sistema fotovoltaico con baterías .....	<b>43</b>
<b>Figura 29.</b> Tasa interna de retorno para un sistema fotovoltaico con baterías.....	<b>43</b>
<b>Figura 30.</b> Desplazamiento del consumo energético debido a un cambio de comportamiento, por tarifa horaria.....	<b>47</b>
<b>Figura 31.</b> Beneficios económicos del cambio de comportamiento, Curva C, todas las tarifas.....	<b>48</b>
<b>Figura 32.</b> Desplazamiento del consumo energético y beneficios económicos del cambio de comportamiento, Curva B, Tarifa Triple.....	<b>49</b>



# Índice de Figuras

<b>Figura 33.</b> Ahorros económicos y ahorros en el subsidio por la aplicación de una tarifa Doble Tipo 2, para el perfil energético de la Curva B.....	<b>50</b>
<b>Figura 34.</b> Pérdida de bienestar del consumidor asociada al consumo de un bien, dado un precio distinto al precio de equilibrio.....	<b>56</b>
<b>Figura 35.</b> Variables a considerar de las tarifas actuales.....	<b>59</b>
<b>Figura 36.</b> Áreas de distribución (ADD) de Colombia.....	<b>61</b>
<b>Figura 37.</b> Costo unitario del sector residencial, ENEL-CODENSA mayo 2021.....	<b>61</b>
<b>Figura 38.</b> Distribución geográfica de los usuarios no regulados.....	<b>62</b>
<b>Figura 39.</b> Curva de demanda promedio de Colombia (Fuente: XM).....	<b>72</b>

# Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Tarifas horarias propuestas con respecto a la curva de demanda horaria nacional. Fuente: Elaboración propia con datos de la curva de demanda por XM.....	<b>18</b>
<b>Tabla 2.</b> Perfiles energéticos de referencia del sector residencial.....	<b>22</b>
<b>Tabla 3.</b> Cambio porcentual en el costo de la energía eléctrica por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía desagregada por tarifa y perfil energético seleccionado.....	<b>25</b>
<b>Tabla 4.</b> Beneficios económicos (COP) para el usuario en función del estrato y el perfil energético en el caso de la aplicación de una tarifa Doble Tipo 1.....	<b>27</b>
<b>Tabla 5.</b> Promedio horario anual de la radiación solar para tres ciudades.....	<b>30</b>
<b>Tabla 6.</b> Características técnicas de los vehículos eléctricos .....	<b>37</b>
<b>Tabla 7.</b> Costos de inversión y operación de los paneles solares .....	<b>41</b>
<b>Tabla 8.</b> Costos de inversión y operación de los paneles solares con baterías .....	<b>42</b>
<b>Tabla 9.</b> Escenarios y variables del análisis de sensibilidad .....	<b>44</b>
<b>Tabla 10.</b> Análisis de sensibilidad para la TIR bajo distintos escenarios .....	<b>44</b>
<b>Tabla 11.</b> Escenarios del análisis para el tiempo de recuperación de la inversión (años).....	<b>44</b>
<b>Tabla 12.</b> Impacto del estrato socioeconómico en la rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos.....	<b>44</b>
<b>Tabla 13.</b> Candidatos potenciales para cambiarse a tarifas horarias, sector Residencial .....	<b>53</b>
<b>Tabla 14.</b> Candidatos potenciales para cambiarse a tarifas horarias .....	<b>53</b>
<b>Tabla 15.</b> Descripción de los estratos socioeconómicos .....	<b>60</b>
<b>Tabla 16.</b> Consumo de subsistencia basado en la altura .....	<b>60</b>
<b>Tabla 17.</b> Número de usuarios no regulados por nivel de tensión .....	<b>62</b>
<b>Tabla 18.</b> Tarifas horarias (dobles y triples).....	<b>63</b>
<b>Tabla 19.</b> Tarifas horarias múltiples .....	<b>64</b>

# Índice de Tablas

<b>Tabla 20.</b> Tarifas horarias en Áreas de Distribución y Mercados .....	<b>65</b>
<b>Tabla 21.</b> Empresas con tarifas horarias .....	<b>65</b>
<b>Tabla 22.</b> Energía generada, importada, consumida y exportada por un AGPE .....	<b>65</b>
<b>Tabla 23.</b> Ciudades de Colombia analizadas .....	<b>67</b>
<b>Tabla 24.</b> Tipos de usuarios evaluados .....	<b>67</b>
<b>Tabla 25.</b> Curvas de demanda, sector Residencial.....	<b>69</b>
<b>Tabla 26.</b> Curvas de demanda, sector Comercial e Industrial.....	<b>71</b>
<b>Tabla 27.</b> Identificador de curvas de demanda por tipo de usuario y clima .....	<b>71</b>
<b>Tabla 28.</b> Períodos de las tres tarifas horarias a evaluar .....	<b>72</b>
<b>Tabla 29.</b> Costos tarifarios horarios sin subsidio ni contribución por ciudad (COP/kWh).....	<b>72</b>
<b>Tabla 30.</b> Consumo y capacidad instalada por tipo de usuario.....	<b>73</b>
<b>Tabla 31.</b> Parámetros técnicos para baterías por tipo de usuario .....	<b>73</b>
<b>Tabla 32.</b> Características técnicas de los vehículos eléctricos a analizar .....	<b>73</b>
<b>Tabla 33.</b> Comportamiento del usuario para el manejo de los vehículos.....	<b>74</b>
<b>Tabla 34.</b> Parámetros financieros.....	<b>75</b>

# Lista de acrónimos

AGPE	Autogenerador en Pequeña Escala
ADD	Área de Distribución
BEIS	Departamento de Negocios, Energía y Estrategia Industrial del Gobierno de Reino Unido (por sus siglas en inglés)
CAPEX	Costo de inversión
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
COP	Pesos colombianos
CS	Consumo de Subsistencia
CU	Costo Unitario
E1, E2, ...	Estrato socioeconómico
kW, MW	Kilowatt, Megawatt
kWh	Kilowatt-hora
MXN	Pesos Mexicanos
NR1, NR2, ...	Perfil energético distinto al residencial
OPEX	Costos de operación y mantenimiento
OR	Operador de Red
R1, R2, ...	Perfil energético residencial
SIN	Sistema Interconectado Nacional



SSPD	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
------	--

STN	Sistema de Transmisión Nacional
-----	---------------------------------

TIR	Tasa Interna de Retorno
-----	-------------------------

UNAL	Universidad Nacional de Colombia
------	----------------------------------

UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
------	--

USD	Dólares Americanos
-----	--------------------

VPN	Valor Presente Neto
-----	---------------------

# 1. Beneficios económicos

## 1.1 Introducción

**Las tarifas horarias pueden ser un instrumento eficaz para modificar el patrón de consumo eléctrico en los sectores residencial, comercial e industrial. Un esquema de tarifas horaria bien diseñado puede generar los incentivos correctos para producir un patrón de consumo eficiente que se traduzca en beneficios no sólo para las y los usuarios finales, sino también para todo el sistema eléctrico y para las finanzas públicas, en particular en casos de existencia de esquemas de subsidios como es el caso Colombiano.**

El sistema tarifario basado en una tarifa monomía, es decir, la aplicación de una tarifa constante a lo largo del día, no genera ninguna señal sobre el precio de la electricidad a lo largo del día. El precio de la electricidad se fija en función de los costos medios de la electricidad. En este sistema, el precio tiene la única función de ser un indicador de los costos promedio de la electricidad para un conjunto de usuarios.

Bajo este sistema, el usuario final percibe el precio de la electricidad como un valor constante y por lo tanto el precio de la electricidad no forma parte de la decisión de consumir electricidad en un horario particular y, por consiguiente conduce a un nulo desplazamiento del consumo a lo largo del día. Es decir, desde un punto de vista estrictamente económico, no existe un sistema eficiente [1] en la demanda de energía (ver Anexo A).

En las siguientes secciones se discuten los principales aspectos que deben considerarse para el diseño de esquemas tarifarios dinámicos eficientes en Colombia que permitan generar beneficios económicos positivos. En la primera parte se discute acerca del origen de estos beneficios y el agente que captura dichos beneficios, ya sea el usuario final, el sistema eléctrico o las finanzas públicas. Al final, se describe brevemente los incentivos mediante los cuales el usuario final pudiera cambiar su patrón de consumo horario y el efecto en los beneficios económicos que producen las tecnología de bajo carbono y redes inteligentes combinadas con tarifas horarias.

## 1.2 Beneficios y captura de beneficios

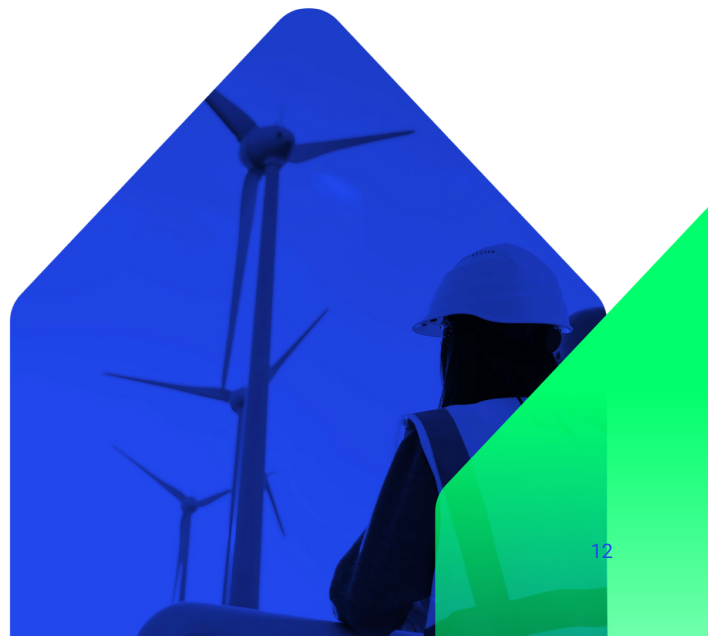
### 1.2.1 Beneficios para los usuarios finales

Una tarifa horaria se basa en la generación de incentivos mediante señales de precios con el objetivo de modificar el consumo de electricidad a lo largo del día. Este sistema se basa en que el usuario final toma como base el precio de la electricidad para decidir su nivel de consumo eléctrico. Por lo tanto, la implementación de tarifas horarias posibilita la gestión de demanda de las y los usuarios finales.

Un usuario racional disminuiría su consumo cuando el precio de la electricidad es alto, y lo desplazaría a los periodos en que el precio de la electricidad es menor. Bajo este supuesto de un agente racional, el costo de la electricidad, es decir, el producto del consumo (kWh) y el precio unitario (\$/kWh), disminuiría, por lo que la factura eléctrica se reduciría, y por lo tanto se generaría un ahorro que quedaría en manos del usuario final vía la factura.

Tales sistemas tarifarios se pueden implementar, mediante autorización del regulador (ver Anexo B), por parte de los suministradores por medio del precio como una señal tangible. Pero su aplicación requiere del uso de medidores inteligentes que provean estas señales de precio dinámicas vía remota. Desde el punto de vista del usuario, el éxito en la captura de los beneficios dependerá del grado en que el este tenga la capacidad de modificar su consumo en general. Este aspecto se analizará con más detalle en la sección 1.3.1.

[1] En economía, el punto de equilibrio se encuentra cuando la oferta y la demanda son iguales. Cualquier consumo distinto al punto de equilibrio se considera ineficiente.



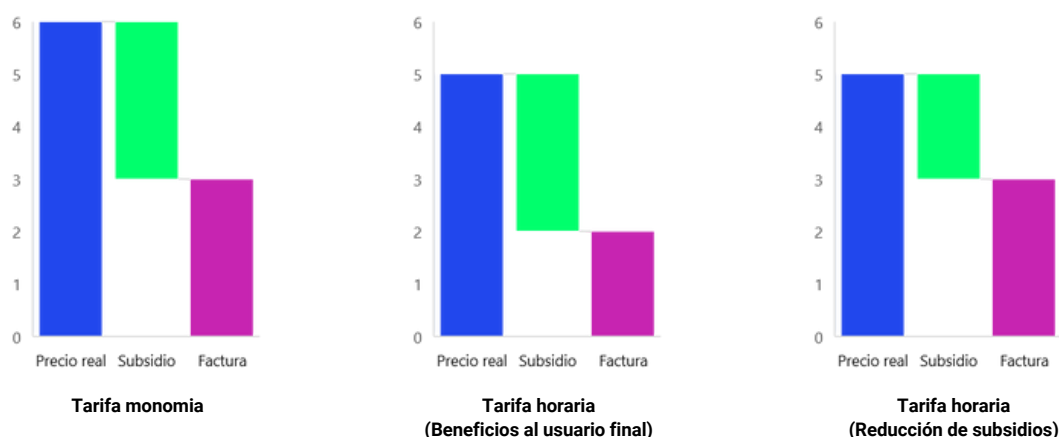
### 1.2.2 Beneficios para el Estado

Además de que el Estado es un actor fundamental en el diseño tarifario, principalmente mediante su papel en la regulación de tarifas a través de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), el gobierno es un actor clave en la captura de los beneficios económicos, en particular, en la presencia de un sistema de subsidios.

En Colombia el sistema tarifario incorpora un esquema de subsidios en el sector residencial. Las tarifas aplicables a este sector se encuentran organizadas bajo seis diferentes bloques tarifarios llamados estratos (E1 a E6). Los bloques están contruidos de acuerdo a indicadores socioeconómicos por tipo de usuario. Los estratos E5 y E6, correspondientes a los estratos con un mayor nivel socioeconómico, pagan 1.2 veces la tarifa de referencia, mientras que los estratos E1, E2 y E3 pagan 0.4, 0.5 y 0.85 de la tarifa de referencia respectivamente (ver Anexo B para mayor detalle). Este sistema es complementado con recursos públicos, lo cuales se estiman que representan alrededor de 0.8 por ciento del total del gasto gubernamental (McRae & Wolak, 2020).

Los posibles beneficios provenientes por la implementación de una tarifa horaria teóricamente podrían ser capturados por el usuario mediante una reducción en el costo total de su factura eléctrica, o por el Estado mediante la reducción del subsidio. En tal caso, el usuario no observará una reducción en el precio de su factura de electricidad.

En la **Figura 1** puede observarse, a modo ilustrativo, esta diferencia en cuando a quien captura los beneficios. En la figura del lado izquierdo, correspondiente a una tarifa monomía, puede observarse que el precio real de la electricidad es de \$600 por kWh, con un subsidio de \$300 por kWh, lo que se traduce en un pago de \$300 por kWh en la factura del usuario final. Bajo el supuesto de que la aplicación de una tarifa horaria genera beneficios económicos, la tarifa eléctrica en promedio es menor [2] tal como se observa en el gráfico intermedio con un valor de \$500/kWh. Si se considera que el subsidio no varía, y se mantiene por lo tanto en \$300/kWh, el pago en la factura del usuario será de \$200/kWh. En este caso, es el usuario final quien captura este beneficio por medio de su factura, el cual corresponde a la diferencia entre la tarifa monomía y la tarifa horaria, es decir, \$100/kWh.



**Figura 1.** Representación de dos esquemas tarifarios y la posible distribución de los beneficios.

Por otro lado, la gráfica de la derecha muestra una aplicación del subsidio en el caso que el usuario no observa una diferencia en su factura de electricidad. En ella se observa que ahora el subsidio se reduce a \$200/kWh, por lo que el pago en la factura se mantiene en \$300/kWh. Es decir, en este caso es ahora el Estado quien observa una reducción en sus egresos por el subsidio, pasando de un subsidio de \$300/kWh a \$200/kWh. En este sentido, es el Estado quien captura estos beneficios.

[2] Una tarifa eléctrica promedio menor no se refiere a que el costo de la electricidad se reduzca, sino que el consumo de electricidad se desplaza a periodos de menor costo, por lo que, en promedio, el costo será menor.

**En función de cuál es la política de subsidios y su foco puede, por lo tanto, darse hipotéticamente el caso en el que el beneficio lo capturan las y los usuarios o el caso en el que el beneficio es únicamente capturado por Estado. Sin embargo en la práctica es recomendable que se cuente con un sistema híbrido con señales de precio adecuadas e incentivos que aseguren la adopción del esquema tarifario por parte de usuarios finales. En el capítulo 5 se discuten algunas propuestas para convertir un subsidio al consumo en un subsidio productivo, es decir, a la inversión.**

### 1.2.3 Beneficios Sistémicos

El sector eléctrico, entendido como un sistema, también es un captador de los beneficios de una tarifa. Dado que los costos de la electricidad están directamente asociados al costo por mantener los sistemas de potencia para satisfacer la demanda, la gestión de cargas mediante la gestión de la demanda se convierte en una herramienta poderosa para incrementar la eficiencia del sistema. Sin embargo, desde un punto de vista del sistema, una tarifa monomía no provee ningún incentivo mediante señales de precio para desplazar la demanda de energía eléctrica de los periodos de altos costos de producción a los periodos de bajos precios de producción. El problema de esta situación es que no existen los incentivos para minimizar los costos mediante la gestión de la demanda, debido a la ausencia de señales de precio. Es decir, el usuario final percibe que el precio de la electricidad es el mismo durante todo el día, por lo que el momento de su consumo es irrelevante.

Los sistemas eléctricos se diseñan para satisfacer los periodos de punta de demanda, por lo que se requiere infraestructura adicional para asegurar que la generación, transmisión y distribución sea suficiente para soportar esos periodos de punta. En este sentido, la inversión necesaria para mantener esta infraestructura hace que en estos periodos los costos de la energía eléctrica se incrementen.

Por lo que si, mediante un sistema eficiente de precios dinámicos, se puede desplazar el consumo de las horas punta a las horas de menor demanda, las necesidades de infraestructura adicionales disminuirían, disminuyendo con ellos los costos de la energía eléctrica. Además de que esto permite una mayor estabilidad y confiabilidad del sistema al suavizar esas rampas de incremento de la generación al iniciar las horas punta (Restrepo, Nope, & Enriquez, 2018).

Es decir, la gestión de la demanda mediante el sistema tarifario a través de señales de precio, permite incrementar la eficiencia del sistema y la asignación eficiente de los recursos, ya que el desplazamiento del consumo permite una utilización más eficiente del parque de las centrales eléctricas, lo cual conduce a una reducción de los costos del sistema; en particular puede permitir también la reducción de la necesidad de nuevas inversiones en infraestructura de generación, transmisión y distribución.

Si bien estos beneficios son significativos, su estimación queda más allá de los alcances del presente reporte. Sin embargo, existen otros estudios, entre estos uno de Carbon Trust, en los que se analizan las repercusiones que tienen los sistemas de gestión de la demanda y sus beneficios sistémicos (UPME, 2020)



### 1.3 Tarifas y comportamiento de la demanda de usuarios finales

Las tarifas horarias como un instrumento para generar los incentivos económicos mediante señales de precios son eficientes en el grado en que logran el objetivo de desplazar el consumo en los periodos de costos altos a periodos de menor costo. En la medida en que se generen los incentivos correctos, el precio de la electricidad debería representar adecuadamente el costo marginal por su consumo.

Sin embargo, al tratarse de un sistema de incentivos, su implementación no necesariamente implica que las y los usuarios finales actuarán de manera racional y desplazarán su consumo a periodos de menor precio.

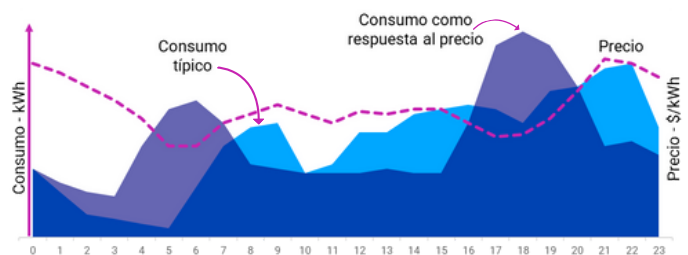
Además, existen restricciones que no permiten un sistema completamente flexible de desplazamiento del consumo. En el contexto de los esfuerzos para la reducción de emisiones, la interacción entre las tarifas horarias y la adopción de tecnologías inteligentes y de bajo carbono son aspectos que tendrán un impacto en la generación de beneficios económicos. En las siguientes secciones se describe brevemente estos aspectos que servirán como base para el análisis posterior.

#### 1.3.1 Cambio de comportamiento vía señales de precios

Los beneficios económicos dependen, por una parte, de las señales de precio para que las y los usuarios finales desplacen su consumo de periodos de costos altos a periodos de costos bajos de la electricidad, pero también de la flexibilidad del usuario final para modificar su consumo a lo largo del día.

A esta flexibilidad se le conoce también como la elasticidad precio de la demanda, es decir, el cambio en el consumo de energía eléctrica debido al precio. La elasticidad precio de la demanda es negativa para el caso de la electricidad ya que, ante incrementos en el precio de la electricidad, el consumo disminuye, es decir, en sentido inverso al cambio. Para el caso contrario sucede lo mismo, es decir, ante reducciones en el precio de la demanda, el consumo aumenta.

La **Figura 2** muestra la modificación del comportamiento de un usuario ante una tarifa dinámica. En este ejemplo se observa que los picos de consumo típico se encuentran entre las 7:00 y 9:00 y entre las 19:00 y 22:00 bajo un esquema de tarifa monomía. Sin embargo, al implementar una tarifa dinámica se observan dos periodos en los que el precio es menor, lo cuales se encuentran entre las 4:00 y 7:00 y entre las 16:00 y 20:00. El consumo de energía eléctrica ahora se desplaza hacia estos periodos en los que la energía eléctrica es más barata.



**Figura 2.** Representación esquemática del cambio en el consumo típico como respuesta a señales de precio.

Las y los usuarios con altos consumos y opciones de alta flexibilidad son los que pueden capturar la mayoría de estos beneficios. Sin embargo, no todas las personas usuarias poseen la misma flexibilidad para desplazar su consumo. Esto es especialmente relevante, por ejemplo, en contextos urbanos, en donde hay periodos en los que las personas no se encuentran en sus hogares, y por lo tanto no pueden desplazar su consumo hacia esos periodos.

### 1.3.2 Adopción de tecnologías de generación y almacenamiento

El sistema tarifario tiene impactos directos en la adopción de tecnologías inteligentes y de bajo carbono. Desde un punto de vista económico, el usuario final se enfrenta a tecnologías cuya viabilidad económica depende del costo por pertenecer a un sistema tarifario; es decir, la adopción de tecnologías dependerá si sus costos de inversión y mantenimiento son menores al costo que paga por el consumo de energía eléctrica proveniente de la red.

Bajo este argumento, en la medida en que un sistema tarifario se base en tarifas eléctricas altas, la viabilidad de paneles solares, por ejemplo, es mayor dado que el diferencial en comparación con el pago de las tarifas sería mayor, y por lo tanto los ahorros serían mayores. Es decir, cualquier instrumento que disminuya las tarifas eléctricas podría desincentivar la adopción de paneles solares.

Lo anterior tiene aspectos importantes que deben analizarse cuando se analiza la interacción entre sistemas horarios e instalación de paneles solares. Por ejemplo, los subsidios a las tarifas eléctricas se comportan como una barrera para los paneles solares, pues la instalación de estos últimos difícilmente podría generar beneficios positivos ante un sistema subsidiado. Este mismo efecto podrían tener la aplicación de una tarifa horaria, pues uno de los efectos es la disminución de los costos en el pago de la electricidad.

Se ha observado que una tarifa monomía tiene mayores incentivos de instalar paneles solares que un sistema de tarifas horarias (McRae & Wolak, 2020). La razón, desde la teoría económica, es que una tarifa monomía significa que el precio pagado por una unidad adicional de la red de energía eléctrica excede el costo marginal de energía fotovoltaica (ver Anexo A).

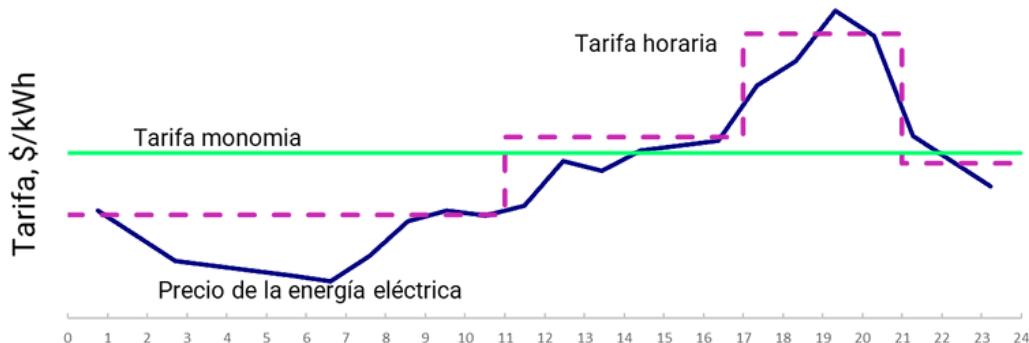
Sin embargo, es importante mencionar que existen oportunidades para el desarrollo de esquemas en los que ambos objetivos sean compatibles. En el capítulo 5 se discutirán las oportunidades de una reestructuración de los subsidios que buscan evitar un impacto distributivo regresivo y al mismo tiempo la adopción de paneles solares en el contexto de la implementación de tarifas horarias.

## 2. Impactos distributivos de las tarifas horarias

### 2.1 Introducción

En este capítulo se describen los resultados del análisis económico, el cual consiste en la estimación de los beneficios económicos a las y los usuarios finales por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía. Los beneficios económicos de la aplicación de una tarifa horaria están directamente relacionados con los perfiles energéticos y el tipo de tarifa horaria aplicada. En la medida en que la tarifa horaria ajuste con mayor precisión los cambios en el consumo y el costo de energía durante el día (ver Anexo A), se generarán mayores beneficios. Este ajuste no sucede al utilizar una tarifa monomía, la cual es la misma a cualquier hora del día.

En la **Figura 3** se muestra de manera ilustrativa este razonamiento. En este ejemplo se observa que una tarifa se modifica a lo largo del día, de tal forma que existen un periodo de bajo precio de la energía (0:00 a 10:59 am), intermedio (11:00 a 16:59 y 21:00 a 23:59) y alto (17:00 a 20:59). Con esto la nueva tarifa, que corresponde a lo que se conoce como una tarifa horaria, captura los cambios en el precio de la energía, a diferencia de una tarifa monomía plana.



**Figura 3.** Diferencia entre un esquema tarifario con tarifa monomía promedio y una con diferenciación horaria. Fuente: elaboración propia.

En las siguientes secciones se muestra que un sistema tarifario horario puede generar beneficios económicos a los usuarios en Colombia dependiendo del tipo de tarifa horaria, el perfil energético (curva de demanda energética) y el sector de demanda al que pertenecen. Cabe mencionar que en el caso del sector residencial, los beneficios económicos dependen también de los estratos tarifarios.

Para determinar los posibles beneficios económicos de las tarifas horarias se construyeron tres tipos de tarifas con base en la curva de demanda horaria promedio de Colombia, las cuales se describen en la Tabla 1. Para definir los precios de cada periodo, se aplicó una variación de de 25 por ciento por sobre y por debajo del costo unitario de referencia (CUREF) para los periodos base y punta, respectivamente (ver Anexo C).

Tarifa	Representación gráfica
<p><b>Tarifa Doble Tipo 1</b></p> <p>Es la tarifa horaria más simple con un periodo de precio alto y otro de precio bajo. Dependiendo de la curva de demanda del sistema eléctrico, el periodo más caro puede ser en el día, en la noche, o en una combinación de ambos. En el caso de Colombia, la curva de demanda muestra que las horas de mayor consumo se encuentran entre 10 am y 10 pm.</p>	
<p><b>Tarifa Doble Tipo 2</b></p> <p>Esta tarifa horaria busca reducir los picos de demanda que se producen al medio día y por la noche. En el caso de Colombia, los picos que se buscaría modificar son los que se dan de 10 am y 2 pm, y de 6 a 10 pm.</p>	
<p><b>Tarifa Triple</b></p> <p>Este tipo de tarifa horaria de tres bandas es bastante común en países como México, Brasil, Argentina, particularmente en el sector industrial. En esta tarifa, el precio base también se considera "nocturno" y para el caso de Colombia, únicamente se ha definido el periodo punta como el periodo de mayor consumo entre 6 y 10 pm.</p>	

**Tabla 1.** Tarifas horarias propuestas con respecto a la curva de demanda horaria nacional. Fuente: Elaboración propia con datos de la curva de demanda reportados por XM.



**La tabla anterior muestra que cada esquema tarifario propuesto (Doble Tipo 1, Doble Tipo 2 y Triple) tiene el objetivo de capturar las variaciones de la demanda de energía eléctrica a lo largo del día. La división horaria (base, intermedia y punta) responde a estas variaciones de la demanda, de manera que, en la medida en que cada tarifa se ajuste de manera más precisa a estas variaciones, la captura de los beneficios económicos por su aplicación será más efectiva. Los resultados por la aplicación de estos esquemas tarifarios en sustitución de una tarifa monomía son discutidos en las siguientes secciones.**

## 2.2 Enfoque

El enfoque utilizado para la evaluación de los beneficios se basa en un modelo tecno-económico[3] que comprende múltiples variables que incluyen, entre otras, ubicación (clima), perfil energético (curva de demanda horaria) y sector (ver Anexo B). Estas variables determinan el perfil de consumo de energía eléctrica de usuarios finales y por lo tanto impactan en los posibles beneficios económicos derivados de la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía (ver **Figura 4**). En efecto, según el valor de estas variables se observa impactos diferenciados a lo largo del país producto del gran número de casos distintos posibles. El objetivo de las siguientes secciones es evaluar el impacto de estas variables en los beneficios económicos en aquellos casos más representativos del conjunto de la demanda eléctrica nacional.

Los casos se han acotado a fin de mostrar los impactos más relevantes de estas variables en los beneficios económicos por la aplicación de una tarifa horaria, los cuales tienen impactos diferenciados, tanto en magnitud como en dirección.

Los perfiles energéticos de los cuales se nutre este reporte se obtuvieron a partir de la caracterización de la demanda de medidores inteligentes realizada por la Universidad Nacional de Colombia (consultar el Anexo C). Las curvas residenciales se pueden identificar por el prefijo R y las curvas no residenciales (comercial e industrial) se pueden identificar por el prefijo NR a lo largo del reporte. En las siguientes secciones se describen los casos de referencia a partir de los cuales se lleva a cabo el análisis, incluido un análisis de sensibilidad, los escenarios seleccionados, las variables utilizadas y los principales resultados.

## 2.3 Sector residencial

En esta sección se describe el impacto de las variables de perfil energético, tarifa y estrato para el sector residencial. A fin de poder aislar el impacto relativo de cada una de estas variables se han seleccionado algunos perfiles energéticos que capturen esta diversidad y que, en la medida de lo posible, muestre casos de referencia para el sector residencial.

La complejidad en este tipo de análisis proviene del supuesto de que al analizar el impacto de una variable individual se asume que las otras variables permanecen constantes, lo cual en un contexto real no sucede. Sin embargo este análisis permite evaluar, de manera aislada, la magnitud y la dirección de su impacto; además de que facilita la identificación de aquellas variables que tienen impactos significativos en los beneficios económicos y que ayudaría, por ejemplo, en el diseño de esquemas tarifarios que tomen como criterio la minimización de los impactos distributivos, o la maximización del beneficio social (ver Anexo A).

<b>Ubicación</b>	
<b>Sector</b> (i.e. Residencial, Comercial o Industrial)	
<b>Perfil Energético</b>	
<b>Tipo de tarifa horaria</b>	
<b>Estrato</b> *solo para Residencial	
<b>Nivel de tensión</b> *solo para Comercial o Industrial	

**Figura 4.** Variables que impactan en los beneficios económicos.

[3] Se trata de la herramienta de estimación de beneficios desarrollada para uno de los componentes de este proyecto.

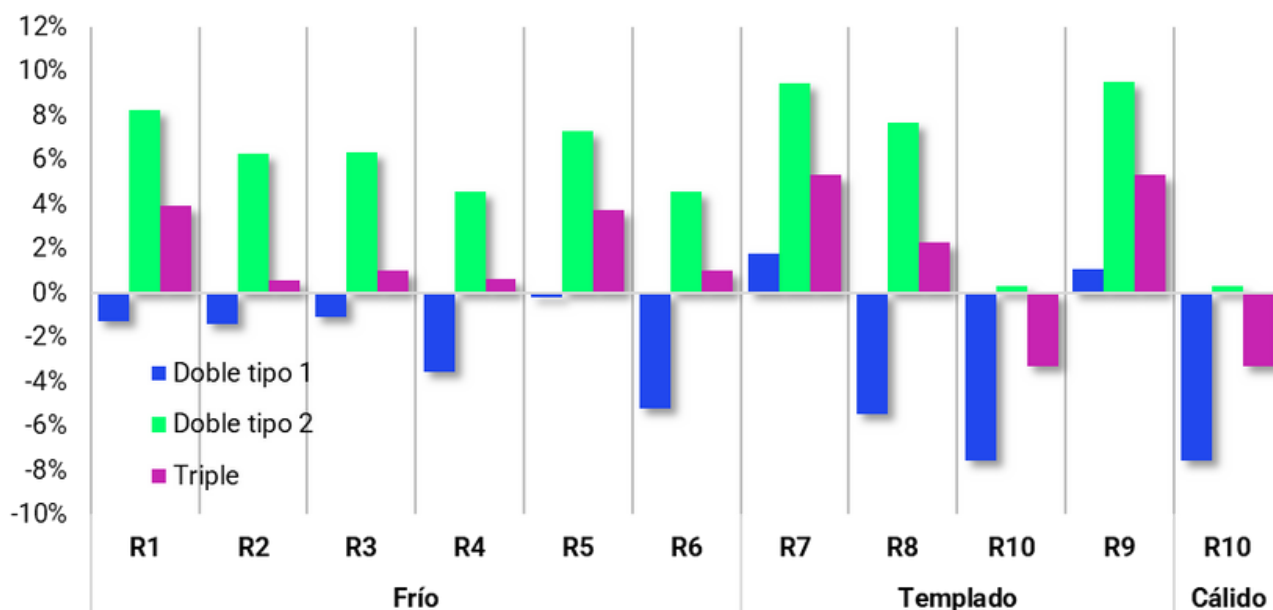
### 2.3.1 Perfil energético y tarifa

El perfil energético se refiere a la curva de demanda horaria de usuarios finales, en este caso, residenciales. Se trata de una de las variables que tiene un impacto directo en la captura de los beneficios económicos pues, en la medida en que las tarifas propuestas (ver sección 2.1) capturen de manera más precisa a las variaciones de las curvas de demanda, los beneficios económicos podrían ser mayores al incrementarse la eficiencia al ajustar la tarifa al precio real de la energía (ver Anexo A). Esto tiene importantes implicaciones en la distribución de beneficios económicos, ya que, ante la diversidad de perfiles energéticos, una tarifa horaria puede generar beneficios económicos significativos para ciertos perfiles, mientras que para otros pueden ser menores o negativos.

La complejidad en el análisis de los perfiles energéticos radica en las múltiples y heterogéneas curvas de demanda del país (ver Anexo B). Se han identificado al menos diez perfiles energéticos en el sector residencial, algunos de estos replicados en más de una condición geográfica, lo cual muestra la complejidad en la construcción de tarifas horarias que captura esta diversidad. Por otro lado, esta multiplicidad de curvas de demanda genera igualmente un impacto heterogéneo, dependiendo de la respuesta de la tarifa horaria al costo horario de la energía.

Esta heterogeneidad se observa en la **Figura 5**, en la cual se representan, en términos porcentuales, los beneficios económicos generados por la aplicación de una tarifa horaria (Doble Tipo 1, Doble Tipo 2 y Triple) en sustitución de una tarifa monomía desagregado por el perfil energético[4]. Los porcentajes corresponden a porcentaje del valor de la factura eléctrica en el caso de tarifa monomía.

Un porcentaje positivo implica que la factura eléctrica final es menor, un porcentaje negativo indica lo contrario. Cabe destacar que se ha asumido, que el usuario final no desplaza su consumo debido a las señales de precio provenientes de la tarifa horaria. Mas adelante se analiza la posibilidad que las y los usuarios desplacen su consumo desde periodos de tarifas altas a periodos con precios más bajos, y se discute sobre el impacto en los beneficios económicos.



**Figura 5.** Porcentaje de beneficios económicos generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía en el sector residencial bajo distintos esquemas tarifarios y perfiles energéticos

[4] Los acrónimos R1 a R10 se refieren a los distintos perfiles energéticos identificados en Colombia. Para mayor detalle ver los Anexos B y B.

**De manera general, se observa que la implementación de una tarifa Doble Tipo 2 muestra beneficios positivos en todos los casos. En la tarifa Triple predominan los beneficios económicos con excepción de dos casos (R10 Templado y R10 Cálido), mientras que la tarifa Doble tipo 1 muestra beneficios negativos (costos) en casi todos los casos.**

En la figura se observa que la variación de los beneficios económicos generados por la aplicación de estas tarifas horarias a usuarios residenciales es diferente según el tipo de tarifa. En efecto, se observa una variación entre -7% y 2% para el caso de la tarifa Doble tipo 1; mientras que para la tarifa Doble tipo 2 la variación es entre -0.8% y 10%; y en el caso de la tarifa Triple, los beneficios van desde -3% a 5%.

Este análisis nos demuestra que frente al cambio a alguna de las tarifas horarias analizadas algunos usuarios observarían impactos positivos (ahorros) mientras que otros impactos negativos (costos). Por ejemplo, usuarios con los perfiles energéticos R7 y R9 se benefician con cualquiera de las tarifas horarias analizadas, por lo que serían usuarios con incentivos para instalar un medidor inteligente y cambiar su tarifa a alguna de esas opciones. En contraste, usuarios con el perfil energético R10, el cual es el que más se asemeja a la curva de demanda de Colombia, y por ende corresponde a usuarios probablemente más representativos de la demanda total nacional, son los usuarios con los mayores impactos negativos por las tarifas horarias analizadas.

Sin embargo es importante resaltar que este análisis no considera un cambio en el comportamiento de la demanda, y por tanto los resultados mostrados en la figura anterior dependen exclusivamente del desfase o de la coincidencia de demanda en los periodos punta con los periodos de precios altos de la tarifa horaria. En la medida en que la mayor parte de los periodos de pico de demanda no sean coincidentes con los picos de precio, se podría esperar que se obtengan mayores beneficios. Esto se verá con mayor detalle en las siguientes secciones, y en particular cuando se relaje el supuesto de no desplazamiento de la demanda por las señales de precio (sección 4.1).

### 2.3.2 Perfiles energéticos de referencia

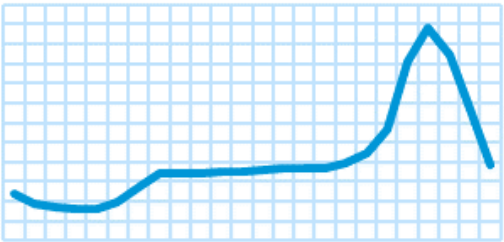
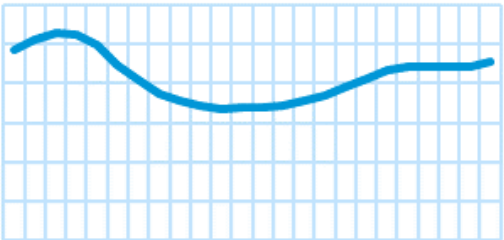
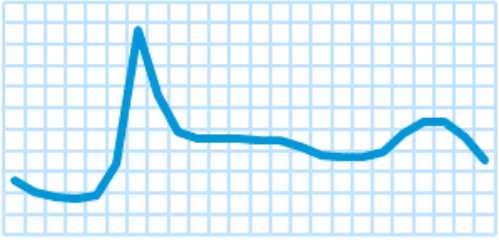
En vista de la variabilidad de resultados económicos según tipos de perfiles energéticos, se han seleccionado perfiles energéticos de referencia para el análisis de las condiciones que impactan en los beneficios económicos de tarifas horarias.

En la **Tabla 2** se describen los perfiles energéticos seleccionados. En esta se presentan el perfil asociado[5], el clima en el que se presenta, su representación gráfica y una breve justificación de por qué se seleccionaron estos perfiles.

Es importante mencionar que si bien estos perfiles energéticos están asociados a distintos climas, no necesariamente permiten concluir sobre el impacto de la variable clima en los beneficios económicos. Un análisis de este tipo debería integrar más perfiles energéticos a fin de asegurar su representatividad y, a partir de ello, poder inferir algunas conclusiones generales en cuanto al clima.

[5] Los distintos perfiles energéticos para el sector residencial se identifican mediante una nomenclatura de R1, R2, etc. Ver Anexo C, Tabla 26 para mayor detalle.



Curva (Perfil y clima)	Perfil energético seleccionado (curva de demanda)	Justificación de la selección de la curva de demanda
<p><b>Curva C</b></p> <p>Todos los climas, Perfil R10</p>		<p>Este perfil de demanda fue seleccionado ya que se presenta en todos los climas y es el que más se asemeja a la curva nacional de demanda en Colombia.</p>
<p><b>Curva B</b></p> <p>Medio / Templado, Perfil R7</p>		<p>Por medio de la caracterización de la demanda se ha concluido que 17% de las y los usuarios residenciales de clima templado poseen un curva de demanda de este tipo. Cabe mencionar que este perfil de demanda se presenta solo en este tipo de clima.</p>
<p><b>Curva A</b></p> <p>Perfil R2, Alto / Frío</p>		<p>A pesar de no ser el perfil energético con el mayor porcentaje de usuarios ubicados en zonas de altura y clima frío, se ha seleccionado este perfil porque únicamente se da en zonas geográficas de altura y clima frío.</p>

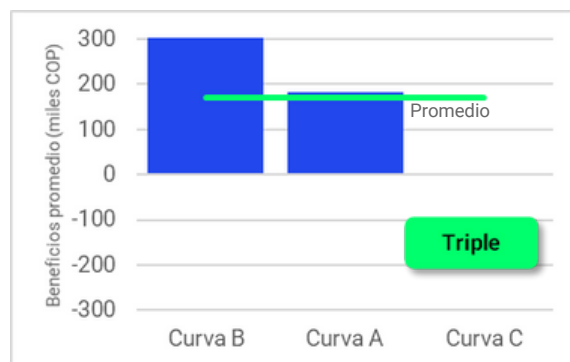
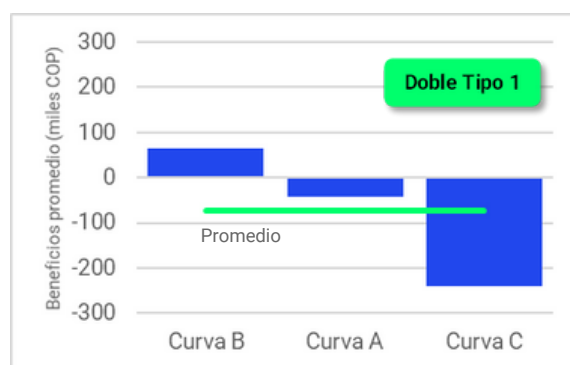
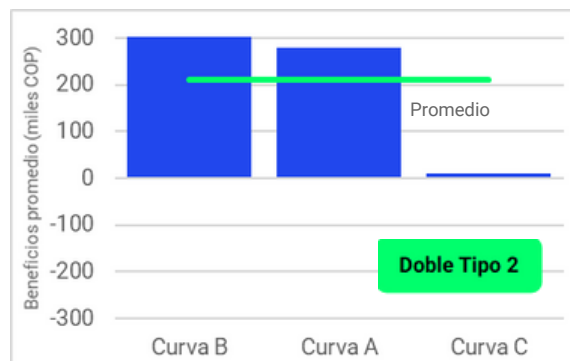
**Tabla 2.** Perfiles energéticos de referencia del sector residencial.

### 2.3.3 Tarifa horaria y beneficios económicos promedio

El perfil energético (curva de demanda) es un aspecto importante en como impacta una tarifa horaria pues se ha observado que no sólo modifica la magnitud del impacto, sino que también cambia su dirección. Es decir, el perfil energético determina si usuarios capturan beneficios económicos positivos (ahorros), o negativos (costos netos). La **Figura 6** muestra los beneficios económicos promedio anuales de un usuario para cada tipo de perfil energético de referencia descritos en la sección anterior, ordenados de mayor a menor. En ella se observa que algunos tipos de tarifa obtienen ahorros (beneficios positivos) por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía; no obstante, también existen casos en los que los beneficios están apenas arriba de cero, o incluso son negativos.

Es importante matizar algunos de estos resultados a fin de evitar generalizaciones en la aplicación de las tarifas. Por ejemplo, en los casos de las tarifas Doble Tipo 2 y Triple el promedio de los beneficios económicos es positivo, es decir, se trata de ahorros monetarios. También se observa que para los perfiles energéticos A y B se generan claros ahorros; sin embargo, para el perfil energético C, los beneficios generados son positivos, apenas arriba de cero.

Por otra parte, en el caso de la tarifa Doble Tipo 1, el promedio de los beneficios económicos es negativo, es decir, genera costos monetarios netos a los usuarios finales; sin embargo, puede observarse que este resultado no es general para todos los perfiles energéticos. En el caso de la Curva B se observan beneficios positivos.



**Figura 6.** Beneficios económicos promedio generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía en el sector residencial de acuerdo al perfil energético.

Lo anterior es importante en el diseño de tarifas horarias, ya que permite concluir que la aplicación de tarifas horarias únicas generará impactos diferenciados según el perfil energético. Por ello se deben considerar estas diferencias en la implementación de tarifas, y probablemente la mejor solución no será una única tarifa horaria generalizada.

### 2.3.4 Tarifa horaria y Estrato

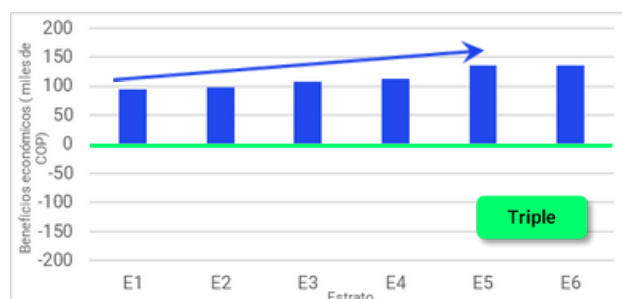
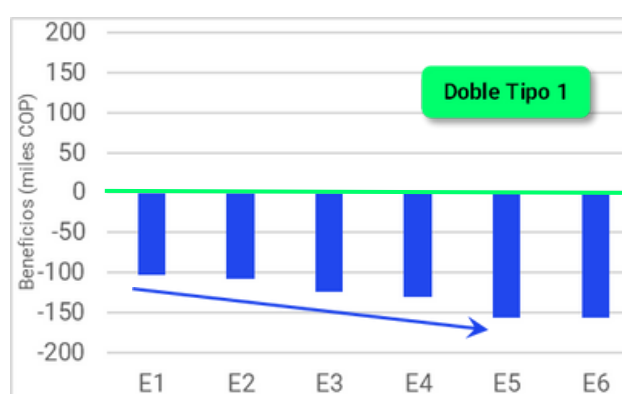
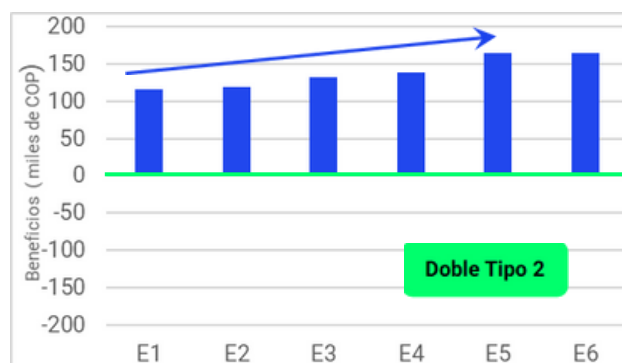
Uno de los aspectos importantes a considerar en el diseño de esquemas tarifarios horarios es el análisis del impacto distributivo por estrato en el sector residencial. Su relevancia proviene de la clasificación de usuarios por estrato, el cual se basa en las condiciones socioeconómicas del lugar en donde viven (ver Anexo B.1 para mayor detalle). Lo anterior tiene repercusiones en su impacto distributivo relativo, es decir, los beneficios económicos capturados por cada estrato en proporción a su ingreso, el cual presenta diferencias significativas para cada estrato.

Lo anterior es un factor de primera relevancia para el diseño de políticas de corte social que utilizan como criterio el impacto de la implementación de políticas en el ingreso de los hogares, lo cual cobra mayor relevancia dado que cerca de 80 por ciento de los hogares corresponden a los estratos de menores ingresos correspondientes a E1, E2 y E3 (McRae & Wolak, 2020).

A continuación, se describen los impactos de la aplicación de una tarifa horaria en los beneficios económicos capturados por las y los usuarios residenciales de acuerdo con su clasificación por estratos. En primer lugar, se describe el impacto en términos absolutos, es decir, en términos monetarios; sin embargo, este impacto se relativiza al contrastarlo con el ingreso promedio por estrato, lo cual provee de un indicador económico para el diseño de tarifas. Ambos aspectos son discutidos en las siguientes secciones.

#### Impacto monetario

El análisis parte del supuesto de un consumo anual igual para todos los estratos a fin de poder aislar los beneficios económicos provenientes de la aplicación de tarifas horarias, sin considerar, por el momento, las diferencias de los consumos entre los estratos. En la **Figura 7** puede observarse que los beneficios económicos varían de acuerdo con el estrato para un mismo perfil de curva de demanda. Se observa una tendencia en la que los estratos de mayores ingresos (E5 y E6) presentan el mayor impacto en términos monetarios. Por ejemplo, en cuanto a magnitud, el impacto monetario es alrededor de 50 por ciento más grande para el estrato E6 en comparación con el E1. Esto es válido tanto en el caso de beneficios económicos positivos (ahorros) como negativos (costos).



**Figura 7.** Beneficios económicos (ahorros promedio) anuales por usuario para cada estrato (E1 a E6) en el sector residencial bajo el escenario de referencia de las Tarifa Doble Tipo 1, Doble Tipo 2 y Triple.

En cuanto a la dirección del impacto, es decir, si la aplicación genera beneficios positivos (ahorros) o negativos (costos), se observa que para el caso de la Tarifa Doble Tipo 2 y Triple, en la que el promedio de los beneficios económicos es positivo, la tendencia es la misma, es decir, en los estratos de mayores ingresos se genera el mayor impacto en términos monetarios.



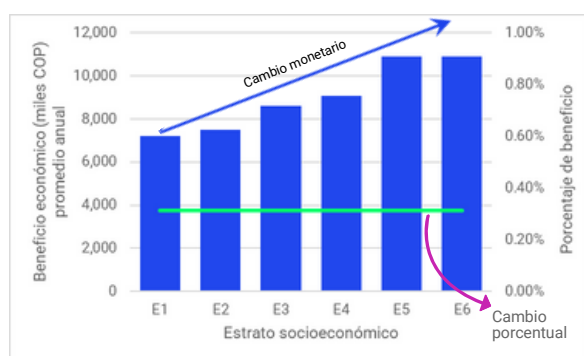
## Impacto en términos relativos

En la sección anterior, se estimó el impacto en términos monetarios para cada uno de los escenarios descritos. Sin embargo, se ha observado que el impacto relativo, es decir, el cambio porcentual del costo de la energía eléctrica por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una monomía tiene impactos homogéneos a través de los estratos. Es decir, el cambio porcentual presenta el mismo valor para todos los estratos. En la **Tabla 3** se muestra el impacto relativo (porcentual) en el costo de la energía al aplicar una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía para todos los perfiles de referencia. Por ejemplo, si se considera la tarifa Doble Tipo 2 para el perfil de referencia B, el cambio en el costo de la energía es de 9.43 por ciento, el cual es el mismo porcentaje para todos los estratos con perfil de demanda de tipo de la curva B.

Clima / Tarifa	Doble Tipo 2	Doble Tipo 1	Triple
Curva B	9.43%	1.80%	9.01%
Curva A	8.24%	-1.26%	5.4%
Curva C	0.31%	-7.58%	-0.05%

**Tabla 3.** Cambio porcentual en el costo de la energía eléctrica por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía desagregada por tarifa y perfil energético seleccionado.

Esto puede observarse de manera esquemática en la **Figura 8**, en la que se observa que el cambio en términos monetarios es mayor para los estratos de mayor nivel socioeconómico; sin embargo, al observar este cambio en términos relativos (porcentuales) el impacto es el mismo para todos los estratos.



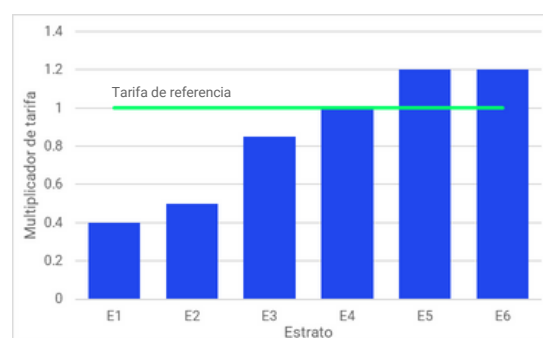
**Figura 8.** Impacto porcentual y monetario por la aplicación de una tarifa horaria Doble Tipo 2 desagregado por estrato.

Esto es importante al momento de reportar los resultados en términos relativos, es decir, en términos porcentuales, ya que esto permite identificar aquellos escenarios cuyo impacto en el costo de la energía es mayor en términos porcentuales, como lo indica la Tabla 3.

## Impacto de los subsidios

Bajo los supuestos del caso de referencia (ver sección 2.3.2), se observa que en este caso particular la aplicación de una tarifa Doble Tipo 2 genera mayores ahorros que la tarifa Triple en cualquier de los tres perfiles de demanda. En cambio, para el caso de la tarifa Doble Tipo 1, los beneficios económicos promedio son negativos (costos). Sin embargo, se debe matizar que se trata de valores promedio que pueden ser positivos cuando el análisis se desagrega por perfil energético, como se discutió en la sección 2.3.1, y la magnitud de estos beneficios o costos dependerán del estrato tal como se observa en la **Figura 7**.

La razón detrás de esta tendencia se encuentra en términos de la tarifa diferenciada por el estrato, en particular, el impacto del subsidio cruzado entre los estratos. Los estratos E5 y E6 pagan 20 por ciento más de la tarifa base, el cual es utilizado como parte del subsidio para los estratos de menores ingresos (E1, E2 y E3) (ver Anexo B); es decir, los beneficios económicos están directamente relacionados con el nivel de la tarifa eléctrica que pagan los estratos socioeconómicos. Esto puede observarse en la **Figura 9**, cuyo comportamiento se asemeja a la **Figura 7**, es decir, se observa que la magnitud del impacto se encuentra directamente correlacionado con el multiplicador de la tarifa, es decir, al subsidio.



**Figura 9.** Multiplicador de la tarifa de referencia para cada estrato socioeconómico.

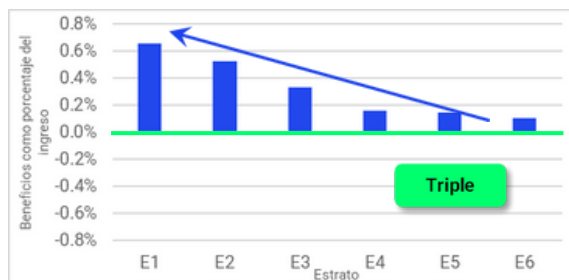
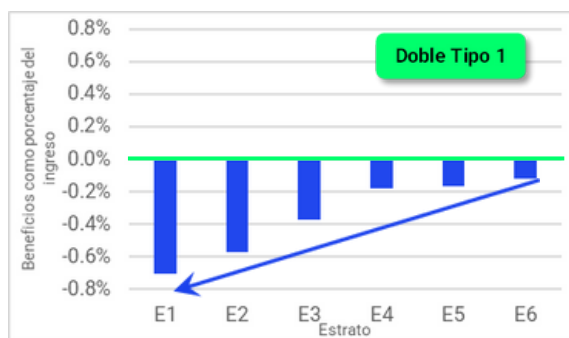
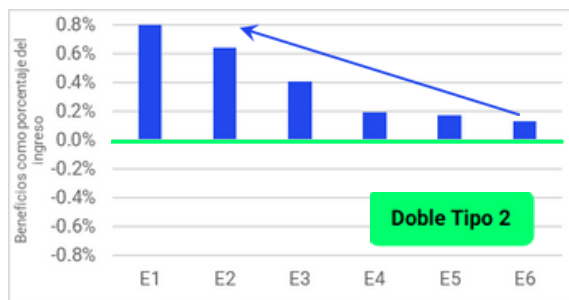
En síntesis, el impacto por la aplicación de una tarifa horaria es mayor para los usuarios que pagan una contribución adicional al costo de la energía; sin embargo, la magnitud del impacto está correlacionada más con el esquema de subsidios, en particular con el multiplicador de la tarifa (ver Anexo B) que con la aplicación de una tarifa horaria.

Es decir, las acciones para mitigar el efecto distributivo deberían enfocarse primordialmente en el esquema de subsidios, más que en el diseño de la tarifa horaria.

**Impacto con respecto al ingreso**

Por otro lado, si analizamos el impacto desde un punto de vista distributivo, la tendencia se invierte. En lugar de considerar el impacto monetario absoluto, ahora se parte del impacto relativo, es decir, el porcentaje que los beneficios representan en comparación con el ingreso promedio de cada estrato. En la **Figura 10** se observa que, en términos relativos, los estratos con menores ingresos son los que resienten un mayor impacto en términos porcentuales.

En el caso de las tarifas Doble Tipo 2 y Triple, éstas generan ahorros (beneficios positivos). En la **Figura 10** puede observarse que el estrato E1 captura, en términos relativos, más de cinco veces de lo que captura E6. Sin embargo, la magnitud de este impacto es en la dirección opuesta cuando se observa el caso de la tarifa Doble Tipo 1, en la que se generan beneficios negativos (costos) para los usuarios.



**Figura 10.** Beneficios económicos (%) mensuales por usuario para cada estrato en el sector residencial bajo el escenario de referencia en relación con el ingreso promedio por estrato.





**Estos resultados tienen repercusiones directas para el diseño de esquemas tarifarios, ya que muestra que en aquellos casos en donde se generan beneficios económicos positivos (ahorros), las y los usuarios de menores ingresos capturan, en términos relativos (porcentuales), mayores beneficios. Sin embargo, en el caso de beneficios económicos negativos (costos netos), son los estratos de menores ingresos los que resienten el mayor impacto.**

Es por ello por lo que un esquema de tarifas horaria debería incluir en su análisis la identificación de aquellos casos en los que se generan costos netos por la aplicación de tarifas horarias en sustitución de una tarifa monomía, porque se podría estar frente a políticas regresivas, es decir, con un impacto económico negativo en los sectores de menores ingresos. Algunas de las políticas que podrían mitigar estos impactos se discutirán en el capítulo 5, en donde se analizarán de manera breve algunas opciones de políticas que propicien la transición hacia tecnologías limpias y con beneficios directos a las y los usuarios.

### Impacto del perfil energético

Hasta ahora todos los análisis en cuanto al estrato han considerado un valor promedio, sin embargo tal como se discute en la sección 2.3.1 el resultado del impacto no solo depende de la tarifa, sino que también del perfil del usuario.

En la **Tabla 3**, podemos observar como una tarifa horaria (Doble Tipo 1) aplicada de forma indistinta a todo el país, sin considerar por ejemplo que los perfiles de consumo regional no necesariamente son los mismos (como fue mencionado en el caso de referencia), puede generar usuarios que si puedan obtener beneficios económicos en algunas regiones, pero en otras pueden generar costos y, por ende, los usuarios preferirían quedarse con su tarifa monomía antes que cambiar a una opción de tarifa horaria. Por lo tanto, considerar los perfiles de consumo de forma segmentada es recomendable al momento de diseñar una oferta de tarifa horaria atractiva para el usuario final.

Perfil energético	Estrato						Promedio
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	
Curva A	-35,628	-36,727	-40,572	-42,220	-50,664	-50,664	-42,746
Curva B	54,267	55,941	61,797	64,307	77,169	77,169	65,108
Curva C	-192,474	-200,889	-230,339	-242,961	-291,553	-291,553	-241,628
Promedio	-92,179	-96,268	-110,583	-116,718	-140,061	-140,061	-129,506

**Tabla 4.** Beneficios económicos (COP) para el usuario en función del estrato y el perfil energético en el caso de la aplicación de una tarifa Doble Tipo 1.

La **Tabla 4** resume por ejemplo los resultados de la tarifa doble Tipo 1 aplicada a través de todos los estratos y los perfiles energéticos de referencia descritos en la sección 2.3.2, a fin de analizar los impactos por estrato y perfil energético a nivel nacional. Dados los perfiles energéticos descritos en esa sección se tomaron los promedios de las regiones de acuerdo con su clasificación por clima. En la tabla los promedios reportados se refieren al promedio de los beneficios de las regiones con curva A asociada en climas fríos, por ejemplo.

En las secciones precedentes se había observado que en el caso de la aplicación de una tarifa Doble Tipo 1, en promedio, tenía impactos negativos [6] (costos) (ver **Figura 7**). Sin embargo, al desglosar esta tarifa por clima, se observa que en regiones con clima templado se generan beneficios positivos. Estos resultados proveen de un indicador adicional para el diseño de tarifas, cuya aplicación deberá considerar no sólo una tarifa horaria homogénea, sino que debería ser diferenciada por región.

[6] En el caso de las tarifas Doble Tipo 2 y Triple no sucedió esto, en todos los climas se observaron beneficios positivos.

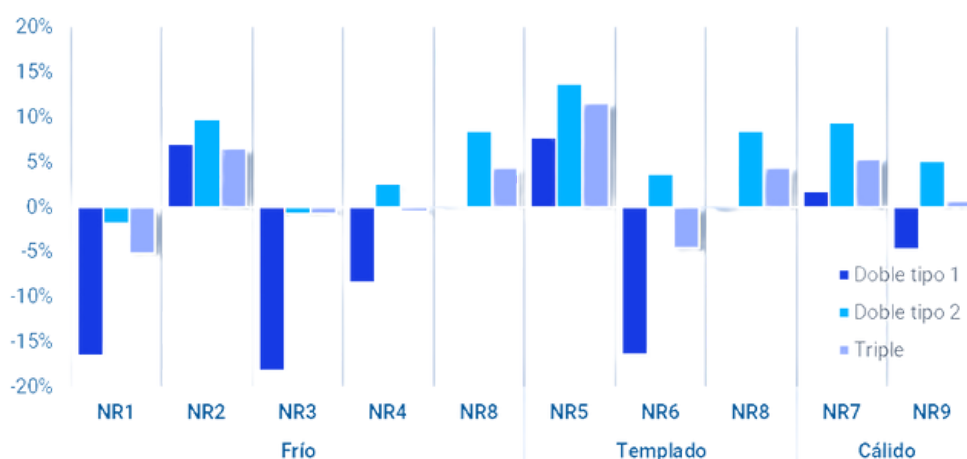


## 2.4 Sectores comercial e industrial

A diferencia del sector residencial, en el que existe un cargo diferenciado en el subsidio, en el sector comercial e industrial no sucede esto en el caso de las tarifas reguladas. En este sentido, no hay un impacto diferenciado en cuanto al nivel de la contribución adicional. Sin embargo, tal como en el caso residencial, se observan impactos diferenciados en cuanto al perfil energético.

En la **Figura 11** se pueden observar estos cambios desglosados por perfil energético. En ella no se observa un patrón que permita concluir una tendencia clara en el comportamiento de los beneficios. Es más, se observa un comportamiento mucho más heterogéneo que en el caso residencial. Por ejemplo, se observa que perfiles como el NR2, NR5 y NR7 [9] se benefician con cualquier tarifa horaria mientras que a los usuarios con perfil NR1 o NR3 no les conviene hacer un cambio a ninguna de las tarifas horarias evaluadas.

Por lo tanto, tal como en el caso residencial conocer el perfil del usuario es clave para poder cuantificar los beneficios económicos para un usuario de estos sectores, y esta información será indispensable para poder ofrecerles una tarifa horaria, en caso de ser clientes regulados.



**Figura 11.** Porcentaje de beneficios económicos generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía en el sector Comercial [7] e Industrial [8] bajo distintos esquemas tarifarios y perfiles energéticos.

Al igual que en el sector residencial, la posibilidad de que una tarifa horaria genere ahorros o sobre costos dependen principalmente del desfase o de la coincidencia de demanda en los periodos punta con los periodos de precios altos de la tarifa horaria. Es decir, en la medida en que la mayor parte de los periodos de pico de demanda no sean coincidentes con los picos de precio, se podría esperar que se obtienen mayores beneficios, bajo el supuesto que estos clientes no modifiquen su demanda.

Finalmente, en cuando a la magnitud de los ahorros o sobre costos, comparando estos resultados contra los del sector residencial, se puede observar que las magnitudes de las diferencias son mayores para este sector. Esto es producto del valor de la tarifa monomía que pagan estos clientes regulados.

[7] Perfiles asociados al sector comercial: NR1 – NR7

[8] Perfiles asociados al sector industrial: NR8 – NR9

[9] Los acrónimos NR se refieren a perfiles energéticos No Residenciales. Para mayor referencia ver Anexo C, Tabla 21).

## Principales hallazgos del análisis de cambio a tarifa horaria

### En este capítulo se ha observado que:

1. **Las tarifas horarias aplicadas de forma uniforme en todo el país**, sin considerar las diferencias en la forma de consumo regional por ubicación y clima, **pueden generar usuarios finales con impactos positivos y negativos.**
2. En términos absolutos, las y los usuarios que capturan beneficios positivos (ahorros) son aquellos que pagan **tarifas más altas.**
3. En el sector residencial, **los beneficios económicos en términos porcentuales son constantes** para usuarios con un mismo perfil energético, sin importar su estrato socioeconómico.
4. Una tarifa horaria tiene un **mayor impacto en los estratos de menores ingresos en términos relativos**, es decir, al comparar su ahorro contra su ingreso.
5. El **perfil energético es una variable crítica** al evaluar los posibles beneficios económicos que la aplicación de las tarifas horarias genera en los usuarios finales.
6. **Algunos tipos de usuarios capturarán beneficios positivos** con cualquiera de las tarifas horarias, aun si modificar su patrón de consumo, mientras que otros no percibirán beneficios con ninguna. Lo anterior puede ser una indicación en cuanto a qué tipos de usuarios priorizar en el proceso de despliegue de medidores inteligentes.

# 3. Impacto en la adopción de tecnologías

La adopción de tecnologías de generación renovable, de almacenamiento y de movilidad eléctrica es una tendencia en ascenso a nivel mundial conforme los costos de adquisición y operación se han reducido y su eficiencia ha aumentado. La aplicación de tarifas horarias, en conjunto con otras políticas públicas, tienen el potencial de habilitar o acelerar la adquisición de estas tecnologías por parte de las y los usuarios finales. En este capítulo, se analizan los beneficios económicos generados por el uso de tarifas horarias combinados con tres escenarios de adopción de tecnologías limpias: paneles solares, paneles solares y baterías, y vehículos eléctricos.

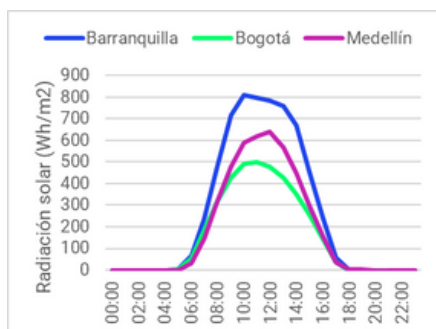
## 3.1 Escenario 1: Paneles solares

En esta sección se analiza el caso en el que un usuario pasa de un esquema con una **tarifa monomía sin paneles solares** a un esquema con **tarifa horaria con paneles solares instalados** con el fin de estimar el beneficio económico de la aplicación de una tarifa horaria, como beneficio adicional al beneficio que por si solos pueden generar los paneles solares.

Para ello, se consideró la instalación de paneles solares bajo diferentes condiciones de radiación solar. En la **Figura 12**, se indican las curvas de radiación promedio horario anual utilizadas, las que fueron aplicadas a los perfiles energéticos del caso de referencia (ver sección 2.3.2).

En cuanto a la capacidad instalada de paneles solares, se consideraron los siguientes valores promedio por sector de demanda:

- Residencial: 2.4 kW
- Comercial: 20 kW
- Industrial: 100 kW



**Figura 12.** Promedio horario anual de la radiación solar para tres ciudades.

Estos supuestos se basan en el hecho de que para el sector residencial, un proyecto convencional requiere de al menos seis paneles de 0.4 kWp cada uno. En cuanto al sector comercial, se asumió que los sistemas fotovoltaicos pueden generar entre un 40% y 67% del consumo anual. Mientras que para el sector industrial, se utilizó el valor máximo de potencia, el cual sirve como referencia para ser considerado un autogenerador de pequeña escala (AGPE). En la **Tabla 5** se detalla la energía generada por los paneles solares ubicados bajo las tres condiciones solares, y el porcentaje de energía correspondiente a la demanda de usuarios residenciales con perfil de demanda de referencia.

Clima / Ciudad	Generación solar, promedio anual (con 2.4 kW instalados)	Porcentaje de la demanda <sup>10</sup> cubierto con la generación solar
Frio / Bogotá	2,897 kWh	48%
Templado / Medellín	3,416 kWh	57%
Cálido / Barranquilla	4,792 kWh	80%

**Tabla 5.** Promedio horario anual de la radiación solar para tres ciudades.

El análisis económico de pasar de una tarifa monomía sin paneles solares a una tarifa horaria con paneles solares, debe considerar que, además del beneficio económico de la tarifa horaria, se tiene que contabilizar el beneficio asociado a la implementación de la tecnología, debido al ahorro por la generación mediante paneles reemplazo de la compra de energía desde la red [11]. Es decir se deben considerar diferentes costos anuales en cada escenario, siendo estos costos anuales los siguientes:

- **Costo anual A1:** Costo anual de la electricidad que paga el usuario con la tarifa monomía.
- **Costo anual A2:** Costo anual de la electricidad que pagaría el usuario con una tarifa horaria.
- **Costo anual B1:** Costo anual de la electricidad que pagaría el usuario con paneles solares y uso de su tarifa actual (monomía).
- **Costo anual B2:** Costo anual de la electricidad que pagaría el usuario con paneles solares y uso de una tarifa horaria.

[10] La demanda anual utilizada para la simulación del sector residencial fue de 6,000 kWh por año.

[11] Por el momento no se consideran los costos de inversión, operación y mantenimiento asociados. Una evaluación financiera de la medida deberá incluirlos.

Los beneficios resultantes corresponden a la diferencia positiva entre estos costos, siendo la diferencia entre los costos A1 y A2 el beneficio de la tarifa horaria sin paneles y, la diferencia entre B1 y B2 el beneficio de la tarifa horaria en condiciones de presencia de paneles solares. Mientras que la diferencia entre A1 y B1, en caso de ser positiva, corresponde al beneficio de la instalación de paneles solares, y la diferencia entre A2 y B2 corresponde a los beneficios acumulados entre la instalación de paneles solares y cambio de tarifa. En caso de ser las diferencias negativas, similar a lo analizado en el capítulo 2, en este caso se trataría de sobrecostos, y por tanto de un impacto negativo.

A continuación, se muestra el porcentaje de beneficios económicos por tarifa y perfil energético, tanto para el sector residencial (**Figura 13**) como para el comercial e industrial (**Figura 14**). Este valor representa el cambio porcentual de los beneficios económicos por pasar de una tarifa monomía sin paneles solares a una tarifa horaria con paneles (i.e., la diferencia entre costos A2 y B2).

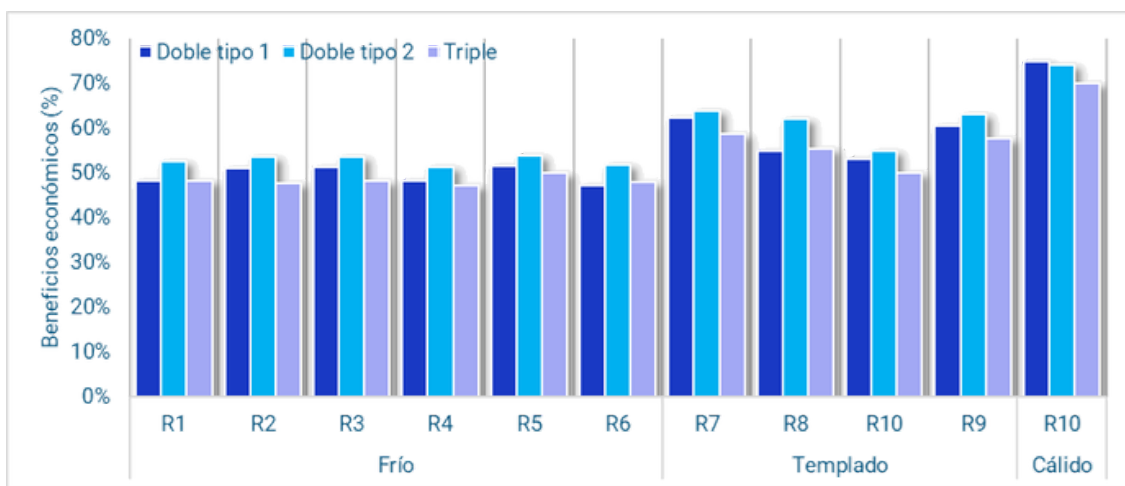


Figura 13. Beneficios económicos con paneles solares, perfiles energéticos del sector residencial

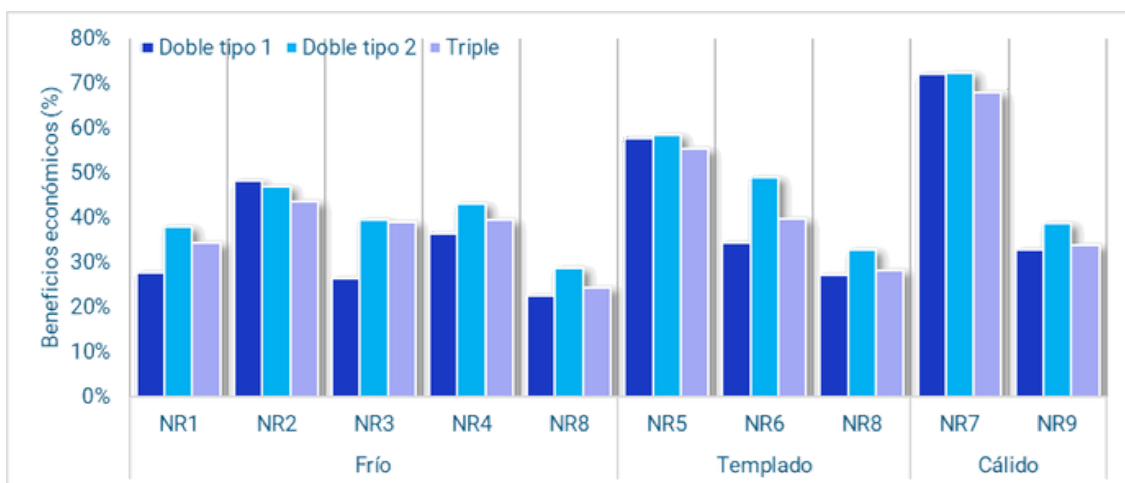


Figura 14. Beneficios económicos con paneles solares, perfiles energéticos del sector comercial e industrial

En ambas gráficas se pueden observar ahorros significativos, siendo en promedio mayores, en términos porcentuales, los del sector residencial ya que los paneles solares cubren un porcentaje mayor de su demanda. Sin embargo, este porcentaje de beneficios económicos, como ya se mencionó es la suma de los beneficios de la tarifa horaria más los beneficios de la generación solar.

Para desagregar cuál es el beneficio real que se obtiene por la tarifa horaria, se presentan dos ejemplos donde se comparan los costos del escenario base contra los costos con paneles solares.

- El ejemplo 1 se presenta en la **Figura 15** y fue modelado utilizando los siguientes parámetros: Ciudad: Barranquilla; Perfil energético: R10; Sector: Residencial; Consumo energético anual: 6,000 kWh; Capacidad instalada: 2.4 kWp; Tipo de tarifa horaria: Triple.
- El ejemplo 2 se presenta en la **Figura 16** fue modelado utilizando los siguientes parámetros: Ciudad: Medellín; Perfil energético: NR5; Sector: Comercial; Consumo energético anual: 60,000 kWh; Capacidad instalada: 20 kWp; Tipo de tarifa horaria: Triple.

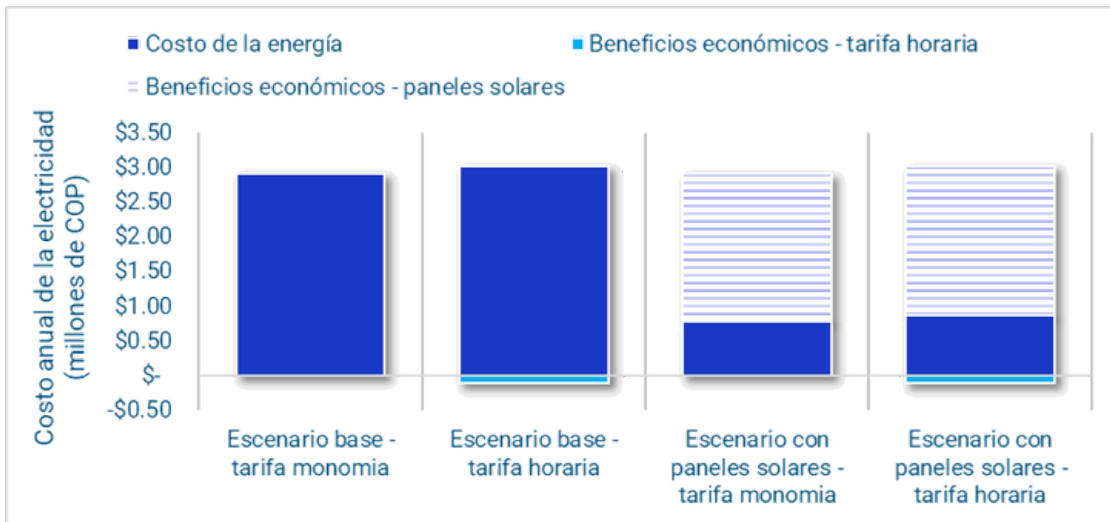


Figura 15. Comparativa escenario base vs escenario con paneles solares, ejemplo 1.

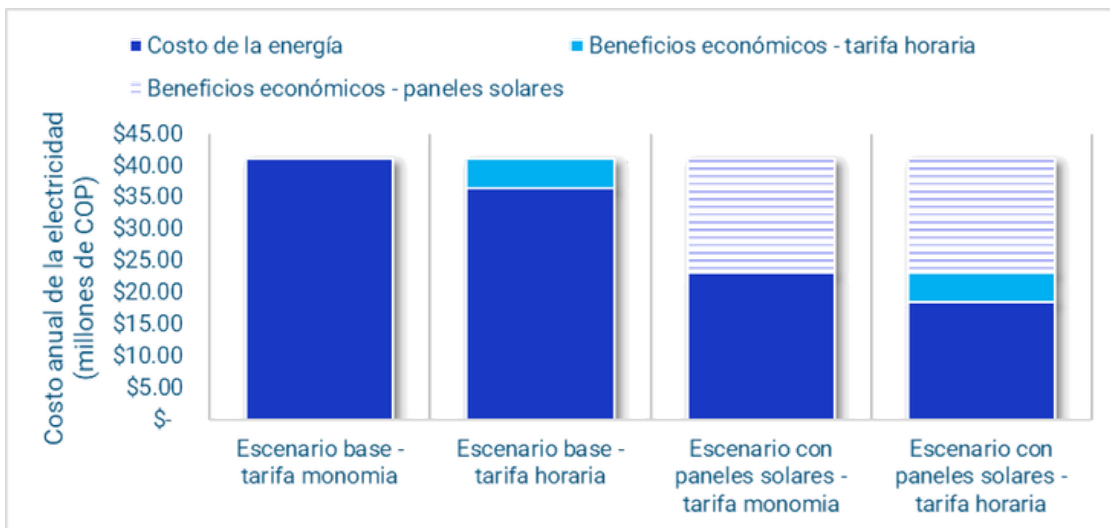


Figura 16. Comparativa escenario base vs escenario con paneles solares, ejemplo 2.

En el primer ejemplo, la tarifa horaria genera un incremento de precio sobre el escenario de referencia. Es decir la diferencia entre A1 y A2 es negativa y por tanto la tarifa horaria genera un sobre costo, como lo indica la segunda barra de la **Figura 15** con un beneficio económico negativo. Cuando se instalan paneles solares, hay una reducción significativa del costo anual, lo que se observa con el gran valor de beneficios producidos por los paneles solares en la tercera barra de la figura. Sin embargo, en el escenario con tarifa horaria y paneles solares, correspondiente a la última barra, el costo final vuelve a ser mayor que en el escenario con paneles y tarifa monomia, producto del sobre costo que genera la tarifa horaria. A pesar de esto, producto del ahorro producido por los paneles, se observa un gran ahorro al comparar los costos A2 y B2, lo cual explica que en el análisis de beneficios relativos se presenten porcentajes de mayor magnitud que cuando se analizó exclusivamente el cambio de tarifa monomia a tarifa horaria.



Por otro lado, en la **Figura 16**, se puede observar que este tipo de usuario al cambiarse a la tarifa horaria triple reduce sus costos de su electricidad y que, si decidiera instalar paneles solares, tanto el beneficio de la tarifa horaria como el de la tecnología se verían acumulados y podría obtener más ahorros que en el caso de solamente instalar paneles solares. Sin embargo, también se puede percibir que el beneficio de la tarifa horaria se mantiene del mismo tamaño en ambos escenarios, por lo que no hay un cambio del beneficio adicional de la tarifa horaria debido a los paneles solares. Esto es porque el beneficio que se produce por el cambio de tarifa ocurre en momentos del día en que no existe radiación solar y por lo tanto dicho beneficio es independiente a la presencia o no de paneles. Cabe recordar que se ha asumido que el usuario no cambia su comportamiento de demanda.

Se observa que según el tipo de perfil energético se puede dar el caso de que una tarifa horaria combinada con paneles solares disminuya el costo total pagado por la energía, como en el ejemplo 2; o que lo aumente, como el ejemplo 1; y que dicho beneficio puede ser independiente de la presencia de paneles solares según los momentos del día en que se produce el beneficio, momentos definidos por las no coincidencias de picos de demanda con picos de precio.

No obstante, a pesar que en algunos casos la tarifa horaria puede no generar mayores beneficios, el momento de la instalación del sistema fotovoltaico es una ventana de oportunidad para pasar directamente de los medidores actuales a medidores horarios, porque si el usuario con tarifa monomía decide implementar paneles solares deberá forzosamente realizar un cambio de medidor estándar a un medidor bidireccional para poder contabilizar la energía que inyecta a la red. Por ende en lugar de hacer escala a un medidor bidireccional hoy y luego pasar al medidor inteligente en el futuro, puede ser más conveniente instalar un medidor horario de una vez, lo que le permitirá adoptar una tarifa horaria en caso que aumente su beneficio, como es el caso de un usuario como el del ejemplo 2 - Figura 16.

### Principales hallazgos de los escenarios con paneles solares

Los usuarios finales pueden obtener beneficios económicos significativos con paneles solares.

La implementación de paneles solares genera una ventana de oportunidad para sustituir los medidores actuales por medidores inteligentes que permiten el uso de tarifa horaria

Sin embargo con las tarifas horarias analizadas, el ahorro (o sobre costo) producido por la tarifa horaria no es afectado por la presencia de paneles solares. El cambio de tarifa no genera un beneficio o incentivo adicional para instalar paneles solares más allá del propio beneficio que genera el panel solar.

## 3.2 Escenario 2: Paneles solares y baterías

En esta sección se evalúan los potenciales beneficios económicos al usuario final por instalar un sistema de almacenamiento de energía con baterías detrás del medidor, como complemento a los paneles solares. Se presentan los beneficios relativos y los beneficios netos entre el escenario de referencia, es decir sin presencia de paneles ni baterías y uso de tarifa monomía, y el escenario con tarifa horaria y tecnologías.

Para realizar este análisis se seleccionó únicamente una curva de demanda por sector, con base a su representatividad. Para el sector residencial se seleccionó el perfil R10, para el sector comercial el perfil NR5 y para el sector industrial el perfil NR8.

Para los paneles solares y sus capacidades, así como para las curvas de radiación solar, se consideraron los mismos supuestos de la sección anterior para efecto de analizar cómo los resultados de estos tres perfiles de demanda cambian en el caso de presencia de batería como elemento adicional al panel solar.

En relación a la batería, se consideró que esta se utiliza para abastecer la demanda en momentos de falta de radiación solar. Pudiendo, dicha batería, cargar energía a partir del excedente solar o desde la red eléctrica en caso de existir un diferencial de precio, para así descargarse en las horas con precios altos, con el objetivo de minimizar el costo final de la electricidad para el usuario. Cabe mencionar que en el caso de una tarifa monomía el único incentivo para el uso de la batería es que existan excedentes de generación solar que se puedan aprovechar. Los parámetros técnicos utilizados en el modelo se pueden consultar en el Anexo C.

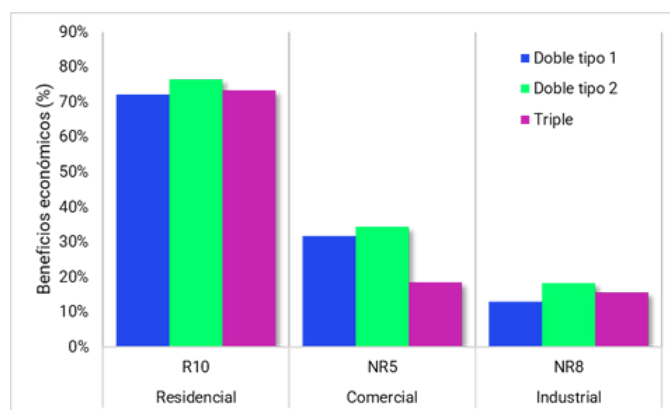
Es importante recordar que, tal como en los casos anteriores, no se considera que el usuario cambie su comportamiento de demanda, lo que se analiza en el capítulo 4.

### 3.2.1 Beneficios relativos contra el escenario de referencia

En caso de la curva seleccionada para el sector residencial [12] se puede observar que la batería permite ahorrar más del 70% del costo de la energía con cualquier tarifa horaria aplicada. La capacidad de la batería para este caso permite guardar toda la energía solar excedente y utilizarla en el periodo con precios más altos.

Por su parte, en el escenario seleccionado para el sector comercial NR5, la batería permite ahorrar entre 18 y 32% dependiendo de la tarifa seleccionada, siendo el mejor caso el caso de la tarifa Doble tipo 2.

Mientras que para el caso seleccionado para el sector industrial, el ahorro económico es menor a 20% con cualquiera de las tres tarifas y siempre menor en comparación con los otros dos escenarios. Lo anterior se debe a que los paneles solares no generan ningún excedente que se envíe a la red eléctrica, ya que para este usuario la batería se dimensionó con respecto a todo su consumo energético en horas punta en tarifa triple.



**Figura 17.** Porcentaje de ahorros con paneles solares y baterías por sector al implementar tarifas horarias.

### 3.2 Beneficios relativos contra el escenario de referencia

Al analizar el beneficio neto para un usuario de pasar de una tarifa monomía sin tecnología a una tarifa horaria con paneles solares y baterías, es necesario considerar que, además del beneficio económico de la tarifa horaria, se tiene que contabilizar el beneficio económico que genera la implementación de la tecnología.

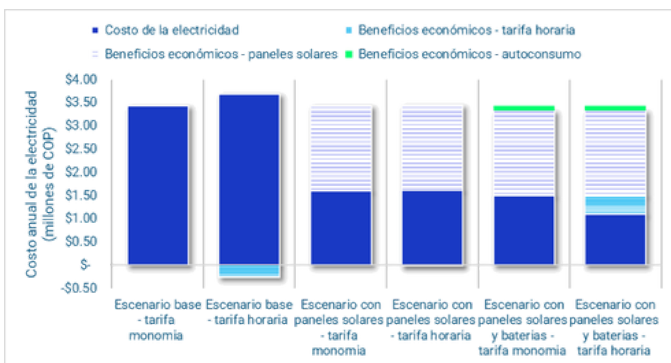
Como se mencionó anteriormente, la batería únicamente puede generar beneficios cuando hay excedente solar en el caso de uso de tarifa monomía. Por lo tanto, el beneficio corresponde a un ahorro que permite la batería, al aumentar el autoconsumo frente al caso de solo presencia de paneles solares.

[12] La curva seleccionada en el sector residencial corresponde a la Curva C, descrita en la sección 2.3.2.



Pero además, a diferencia del caso con solo paneles solares, la batería puede generar ahorros adicionales debido a su capacidad de desplazar los momentos en que el usuario utiliza la red para abastecer su demanda, más allá de la presencia o no de radiación solar, lo que puede ser muy ventajoso en caso de una tarifa horaria y, por lo tanto, los beneficios económicos asociados se muestran en la categoría tarifa horaria.

La **Figura 18** muestra esos resultados al aplicarse una batería al caso usado en el Ejemplo 1 de la sección anterior, correspondiente a un usuario residencial con perfil energético de referencia R10 y uso de tarifa Doble tipo 1. Como se puede observar en este ejemplo, la tarifa horaria Doble Tipo 1 genera un incremento en el costo de electricidad, al igual que la tarifa Triple, para este tipo de usuario. Pero en este caso, al agregarse paneles solares y uso de tarifa horaria, el sobre costo desaparece debido al momento en que se presenta la radiación solar, tal como se observa en la cuarta barra de la figura.



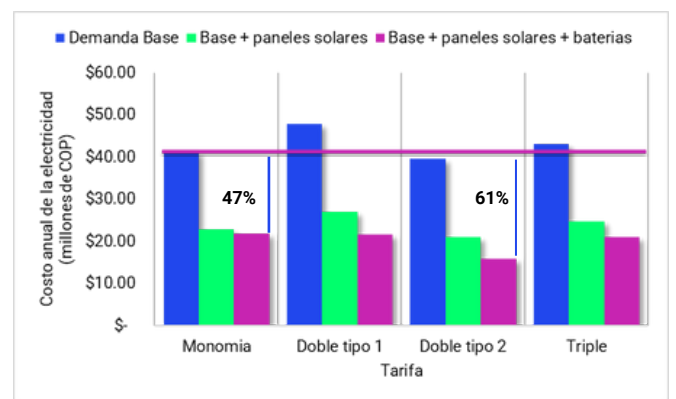
**Figura 18.** Comparación de costos y beneficios en diferentes escenarios.

Por otro lado, al agregar baterías a los paneles manteniendo la tarifa monomía, correspondiente al resultado de la quinta barra desde la izquierda, se observa que la batería genera un ahorro adicional en este caso exclusivamente por la utilización del excedente solar para autoconsumo. Sin embargo, si se analiza el mismo caso con tarifa horaria, correspondiente a la última columna a la derecha de la **Figura 18**, existen ahorros adicionales significativos producidos por la presencia de la batería, los que en este caso se suman al del autoconsumo.

Al evaluar el beneficio económico de forma acumulada este usuario puede pasar de pagar un 8% adicional a ahorrar un 53% con paneles y un 15% adicional si se instalan las baterías.

Cabe mencionar que este perfil de usuario residencial fue el más afectado negativamente de forma relativa por el cambio a tarifa horaria Doble tipo 1 (ver Figura 5), y aun así con las tecnologías instaladas percibe ahorros significativos, demostrando que en este caso la presencia de baterías puede cambiar significativamente la conclusión en cuando al beneficio que un usuario puede capturar o no producto del uso de tarifa horaria.

Considerando que con el ejemplo anterior se puede apreciar de dónde vienen los beneficios económicos asociados a las baterías, para el caso comercial e industrial se presenta una visualización consolidada, ya considerando todas las tarifas con el mismo perfil energético, NR5 en el caso de la **Figura 19** y NR8 en el caso de la **Figura 20**, pero sin la desagregación de beneficios.



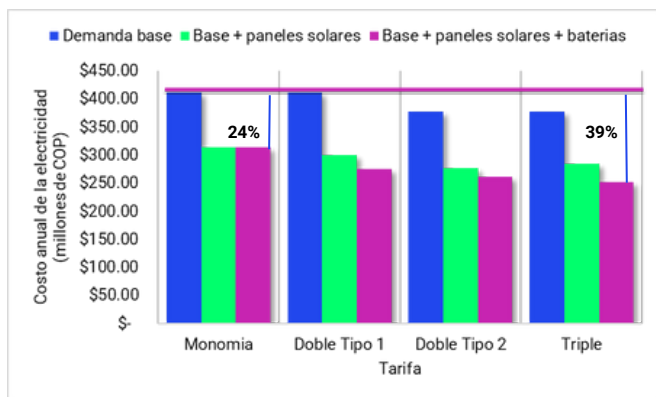
**Figura 19.** Comparación de costos por tipo de tarifa y escenarios uso de la demanda base industrial NR5

Los resultados de las **Figura 19** y **Figura 20** muestran los diferentes costos netos anuales del escenario base y de las diferentes opciones de tarifas horarias. Al observar la **Figura 19**, se concluye que el uso de tarifa horaria sin presencia de tecnologías produce un incremento de costos en el caso de dos de las tres tarifas horarias analizadas, pero al instalarse paneles y baterías en todos los casos se obtienen disminución de costos significativos y por lo tanto un beneficio positivo desde el punto de vista económico.

En efecto, para el caso de un usuario con perfil NR5 se observa que la combinación de paneles solares y baterías permite un ahorro de 47% en el caso de uso de tarifa monomía, pero este puede llegar a 61% con respecto a los escenarios sin tecnologías, si se usa la tarifa horaria Doble tipo 2.

Aumentos significativos similares se observan también si se usan cualquiera de las otras dos tarifas en un escenario de paneles solares y baterías.

Una conclusión similar se analizar el caso del perfil NR8 presentado en la **Figura 20**, correspondiente en este caso a un usuario industrial. Aunque el monto de los ahorro son menores que en el caso del perfil NR5, estos siguen siendo considerable y por lo tanto se observa en este caso también que las baterías permiten un aumento del porcentaje de ahorro importante cuando se combinan con tarifa horaria.



**Figura 20.** Comparación de costos por tipo de tarifa y escenarios uso de la demanda base industrial NR8

En resumen, por medio del análisis realizado en esta sección, se ha demostrado que los sistemas de almacenamiento de energía con baterías y las tarifas horarias se complementan, y pueden llegar a generar ahorros importantes adicionales en la medida de qué tanta energía se pueda dejar de consumir desde la red en periodo punta, y desplazarse al periodo base.

Cabe mencionar que debido a que no se ha considerado cambio del comportamiento de la demanda, este desplazamiento es en la practica un cambio en uso de la red sin cambiar el momento en que se realiza el consumo. Es decir, el desplazamiento se debe exclusivamente al funcionamiento de la batería que permite reemplazar la red en momentos de punta por medio de de la descarga de la energía almacenada, energía que su vez fue cargada en la batería en el período base. Debido a lo anterior, es por lo tanto importante el tamaño de la batería que se utilice, lo que impactará directamente en la inversión necesaria.

El análisis financiero que incorpora el costo de inversión y operación asociados a la instalación de paneles fotovoltaicos con baterías se presenta en la sección 3.4.

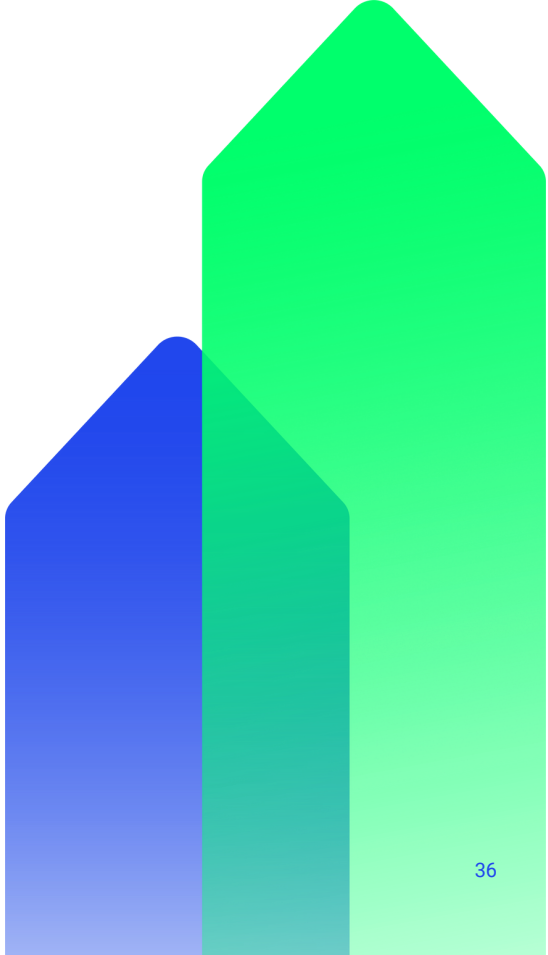
La estimación del valor presente de los flujos monetarios durante la vida útil de las tecnologías, es decir, el flujo neto de los costos de inversión y operación, así como de los beneficios provenientes por la aplicación de tarifas horarias es determinante en la viabilidad financiera de estos proyectos.

Para los usuarios finales, sobre todo para los que pagan tarifas más altas, será clave evaluar si los beneficios adicionales que pueden obtener por la aplicación de una tarifa horaria son lo suficientemente significativos para que puedan recuperar la inversión en un plazo deseable.

**Principales hallazgos de los escenarios con paneles solares + baterías**

Las tarifas horarias habilitan a los sistemas de paneles solares con baterías para generar beneficios económicos adicionales que con la tarifa monomía actual no pueden generar.

Este beneficio corresponde a un ahorro producto del cambio en el momento de uso de la red. Por lo que el tamaño de la batería necesario es relevante.



### 3.2 Escenario 3: Vehículos eléctricos

En contraste con las tecnologías anteriores, para el escenario de vehículos eléctricos no se consideraron las curvas de demanda mencionadas anteriormente ni la combinación de esta demanda con otras tecnologías, únicamente se construyeron las curvas con la demanda de los vehículos. Esto debido a que incluir vehículos eléctricos representa añadir un incremento del consumo de energía del usuario y normalmente se instala un medidor aparte en los centros de recarga.

Además, se analizaron los siguientes tres escenarios: tarifa monomía, tarifa horaria con carga estándar y tarifa horaria con carga inteligente. Para los primeros dos se asume que los vehículos eléctricos empiezan a cargar inmediatamente después de que se conectan mientras que, con carga inteligente, esperan a las horas con menor precio para cargarse.

Para poder hacer distinción entre los sectores se analizaron 5 tipos diferentes de autos. Al sector residencial se le asignó un auto, al sector comercial tres autos y al sector industrial cinco autos. También se consideraron diferentes tipos de cargadores, de los cuales ya se tiene registro que han sido aplicados al menos en la ciudad de Bogotá. Todos estos parámetros se resumen en la **Tabla 6**.

	Auto 1	Auto 2	Auto 3	Auto 4	Auto 5
Número de autos por tipo	1	1	1	1	1
Capacidad utilizable de la batería	30 kWh	55 kWh	55 kWh	86 kWh	86 kWh
Capacidad del centro de carga	7 kW	10 kW	43 kW	10 kW	50 kW
Eficiencia	5 km/kWh	5 km/kWh	5 km/kWh	5 km/kWh	5 km/kWh

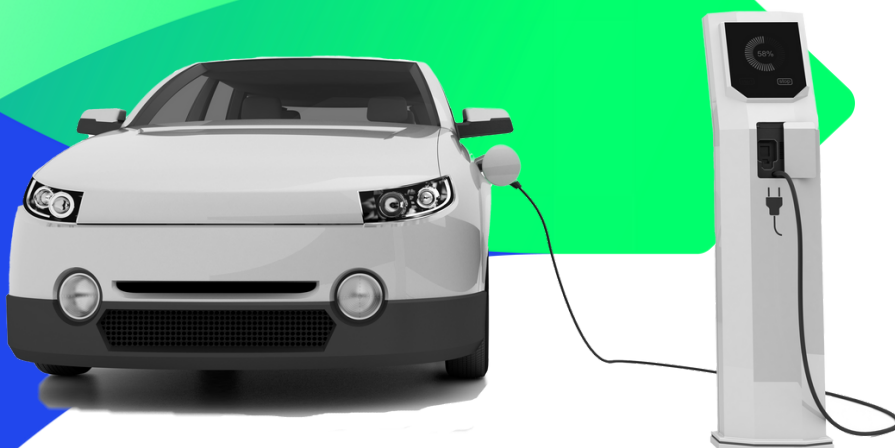
**Tabla 6.** Características técnicas de los vehículos eléctricos analizados

Cada auto de la **Tabla 6** posee diferentes patrones de uso, según el sector al que corresponden. Estos patrones se determinaron de acuerdo con un estudio realizado por Element Energy acerca del comportamiento de carga de los vehículos eléctricos en el Reino Unido (Element Energy, 2019). Los datos utilizados en la simulación se encuentran en el Anexo C.

A continuación, se muestran los resultados de carga de los vehículos y la carga total por hora en caso que los siguientes vehículos se cargaran en un mismo sitio. Lo anterior sirve para ver el comportamiento de cada uno de los autos como usuarios por separado, o de un usuario propietario de los 5 vehículos (e.j., un usuario industrial).

En todos los casos se consideró que los vehículos siempre deben mantener un mínimo de carga en la batería para completar sus itinerarios sin problemas, por lo que los vehículos no se descargan al nivel mínimo de energía, disminuyendo los tiempos de recarga.

Es importante recalcar que los resultados únicamente reflejan la dinámica de carga y los costos bajo los supuestos actuales y que se utilizan para realizar inferencias generales sobre el comportamiento técnico y económico de los vehículos eléctricos.



En la Figura 21, podemos observar el escenario con carga inteligente aplicables tanto para tarifa monomía como tarifa horaria. Es importante recordar que los vehículos tienen diferentes capacidades, se cargan con cargadores de diferente potencia y que se conectan a distintas horas a la red eléctrica.

Al comparar el perfil de carga en tarifa Doble tipo 1 respecto a la tarifa monomía, se puede observar que ninguno de los vehículos carga después de las 10 am ni antes de las 10 pm, dado el costo de la tarifa durante ese periodo punta. Por lo tanto, los vehículos que cargaban antes de las 10 am no sufren modificaciones mientras que los que cargaban en el periodo punta, desplazan su horario de carga a partir de las 10 pm. Esto genera que se genere un consumo de energía mayor en un periodo relativamente corto. Esto será cierto siempre y cuando el usuario tenga esa capacidad de conexión. El consumo de energía horario máximo pasa de 8 kWh por la mañana a 18 kWh por la noche, en caso que todos los vehículos se carguen al mismo punto de conexión a la red.

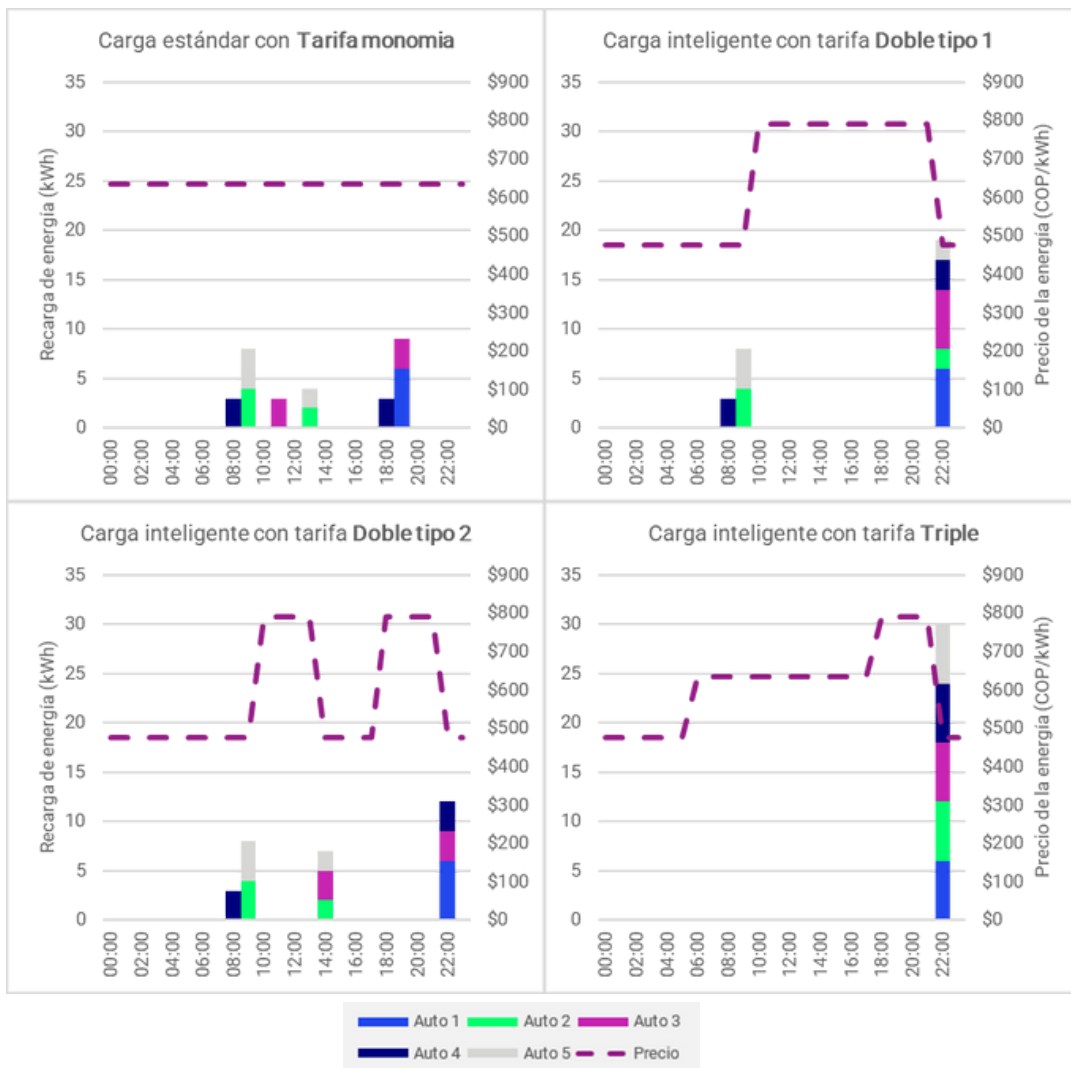
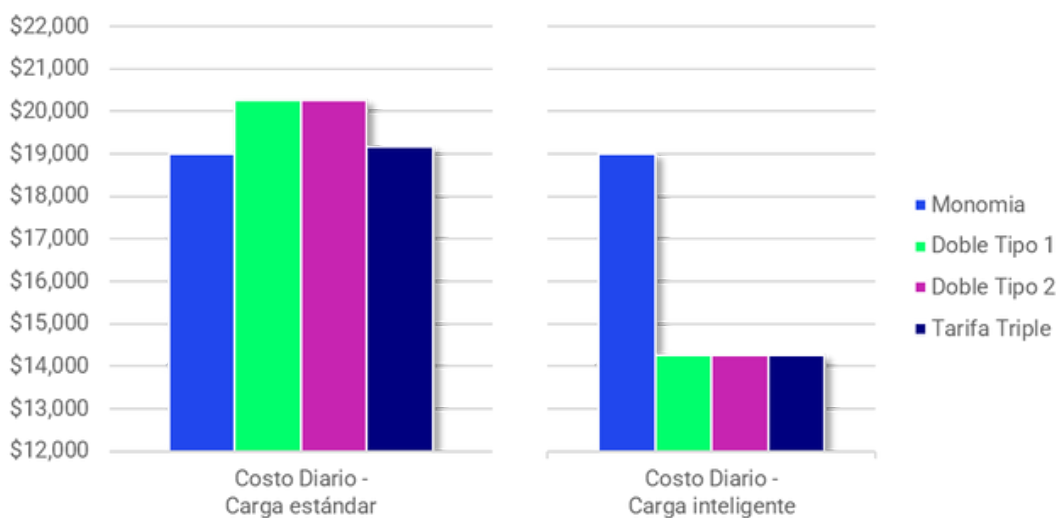


Figura 21. Perfiles de carga de la flota vehicular (5 vehículos) bajo diferentes tarifas

Con la tarifa Doble tipo 2, se tienen dos periodos con precios altos, de cuatro horas cada uno: de 10 a 1 pm y de 6 a 10 pm. Al igual que en el caso anterior, al existir carga inteligente los vehículos esperan a cargar hasta el periodo con precio bajo. Esto produce que los vehículos que se conectan a la red en el primer periodo punta no cargan hasta la 1 pm y que los que se conectan de las 6 pm en adelante empiecen a cargar a partir de las 10 pm. Aunque el periodo de consumo máximo de energía coincide con el escenario anterior, la magnitud es menor, en caso que todos se conecten a un mismo punto de conexión a la red.

Con la tarifa Triple, el periodo con menor costo va de las 10 pm a las 6 am y el periodo de mayor costo es de 6 pm a 10 pm. Como el vehículo eléctrico se carga únicamente en el periodo de menor costo, no se considera la tarifa intermedia y por lo tanto, los vehículos esperan a cargarse hasta que empieza el periodo base a las 10 pm. El consumo de energía máximo alcanza los 30 kWh con esta tarifa horaria en caso de cargarse todos los vehículos al mismo punto de conexión de la red, lo cual es mayor a los 18 kWh de la tarifa doble tipo 1 y a los 12 kWh de la tarifa doble tipo 2.



**Figura 22.** Costos de carga diario entre los escenarios de carga estándar y los escenarios de carga inteligente.

En el tema económico se puede observar el cambio a tarifa horaria incrementaría el costo total de carga de los vehículos eléctricos, particularmente para el caso de las tarifas Doble tipo 1 y Doble tipo 2 al considerarse una carga estándar. Pero al analizar la opción de una carga inteligente, es decir una carga según la señal de precio, se logra ahorrar aproximadamente un 25% con respecto a la tarifa monomía, y un 30% con respecto a la tarifa horaria con carga estándar.

Es decir, en el caso de que todos los 5 vehículos se carguen al mismo punto a la red, el cambio a tarifa horaria incrementa el costo de carga diario mientras que el cambio a carga inteligente reduce el costo de carga diario por debajo del escenario inicial. Sin embargo, el cambio a carga inteligente también incrementa los picos de consumo de la red eléctrica de 8 kWh a 30 kWh, dependiendo la tarifa horaria seleccionada.

Este pico de demanda bajo una carga estándar es determinado por el comportamiento de los consumidores, la cantidad y la potencia de los cargadores disponibles y las restricciones técnicas del punto de interconexión. Mientras que bajo una carga inteligente, la carga se realiza en cuanto empiece el periodo con precios más bajos, lo que ocasiona un incremento súbito de la demanda que se observa en el periodo base, pero que contribuye a su vez con el aplanamiento de la curva de demanda nacional.

Todo este análisis representa un ejemplo simplificado del beneficio económico que pueden obtener los usuarios finales con las tarifas horarias, pero también del desplazamiento de cargas que pueden generar al cargar únicamente en periodo base y el impacto que puede tener a la red eléctrica.

#### Principales hallazgos de los escenarios con vehículos eléctricos

Las tarifas horarias, combinadas con vehículos eléctricos que carguen de forma inteligente, es decir, con base en las señales de precio, pueden generar ahorros significativos para los usuarios finales.

Para prevenir incrementos en los picos de demanda ya existentes, establecer por default una carga inteligente con tarifa horaria es fundamental en caso de despliegue masivo de vehículos eléctricos.

### 3.4 Análisis de factibilidad económica

En las secciones previas se estimaron los beneficios generados por la aplicación de tarifas horarias en sustitución de una tarifa monomía bajo distintos escenarios de presencia de tecnologías: con paneles solares, con paneles solares y baterías, y con vehículos eléctricos. En la siguiente sección se complementará el análisis evaluando si la magnitud de los beneficios adicionales permiten la rentabilidad de la inversión necesarias para el despliegue de dichas tecnologías por parte de los usuarios. Este análisis solo se realizó para paneles solares y paneles con baterías, pues estas tecnologías interactúan con las demanda base y no corresponden a una nueva demanda, como en el caso del vehículo eléctrico, cuyo motivo de inversión es independiente y esta fuera de los marcos de este estudio.

Para realizar este análisis, se consideraron únicamente los usuarios del sector residencial con contribución, ya que son los que tienen las tarifas más altas y su consumo de electricidad es mayor en Colombia. Para simplificar el análisis, se seleccionaron únicamente los tres perfiles energéticos de referencia, los cuales se presentaron en la sección 2.3.2. La curva C (R10) es el perfil con el mayor incremento de costos al cambiar a tarifa horaria mientras que la Curva B (R7) es el perfil con mayor ahorro al cambiar a tarifa horaria, mientras que la curva A representa un escenario intermedio.





Como se ha realizado a lo largo de este capítulo, se asume que el usuario final no cambia su comportamiento, situación que se analizará en el capítulo siguiente. El resto de las variables usadas para realizar es estudio de viabilidad económica se resumen en la **Figura 23**, mientras que los parámetros técnicos y económicos se presentan en el Anexo C.

A continuación se presentan los resultados por tecnologías y adicionalmente se realiza un análisis de sensibilidad sobre algunos de los parámetros financieros utilizados. Es importante resaltar que los resultados no consideran los incentivos fiscales que actualmente se aplican en Colombia para estas tecnologías.

Perfiles energéticos	Tarifa	Ciudades (Radiación)	Tecnologías	Resultados	Sensibilidad
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curva C (R10)</li> <li>• Curva B (R7)</li> <li>• Curva A (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monomía</li> <li>• Doble tipo 1</li> <li>• Doble tipo 2</li> <li>• Triple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bogotá (A y C)</li> <li>• Medellín (B y C)</li> <li>• Barranquilla (solo C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paneles solares</li> <li>• PV + Baterías</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAPEX, OPEX</li> <li>• VPN</li> <li>• Período de recuperación</li> <li>• TIR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de cambio</li> <li>• Inflación</li> <li>• Precio solar</li> <li>• Estrato</li> </ul>

**Figura 23.** Variables del análisis de factibilidad y sensibilidad

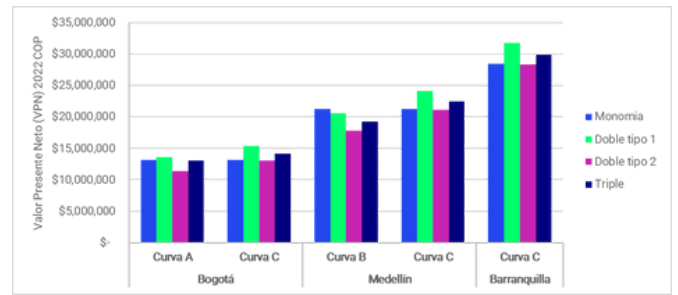
### 3.4.1 Factibilidad de los paneles solares

La inversión y los costos operativos se calcularon a partir de los parámetros financieros definidos en el Anexo C. La Tabla 8 resume los resultados de los costos a valor presente considerando un sistema fotovoltaico de 2.4 kW.

Paneles solares	Costos calculados (COP)	Costo total en 25 años, valor presente neto (COP, 2022)
CAPEX (Inversión)	\$13,680,000	\$13,680,000
OPEX (Operación y Mantenimiento)	\$136,800/año	\$2,290,402

**Tabla 7.** Costos de inversión y operación de los paneles solares

Los flujos de efectivo y el Valor Presente Neto (VPN) se determinaron asumiendo un consumo de energía constante de 500 kWh mensuales, una inflación del 6%, una tasa de descuento del 9% y una tasa de degradación de los paneles solares del 0.5% anual (ver Anexo C.4). Los flujos positivos representan los ahorros en el consumo de energía con respecto al escenario sin paneles solares mientras que los flujos negativos representan el costo de la inversión y el gasto de operación anualizado.

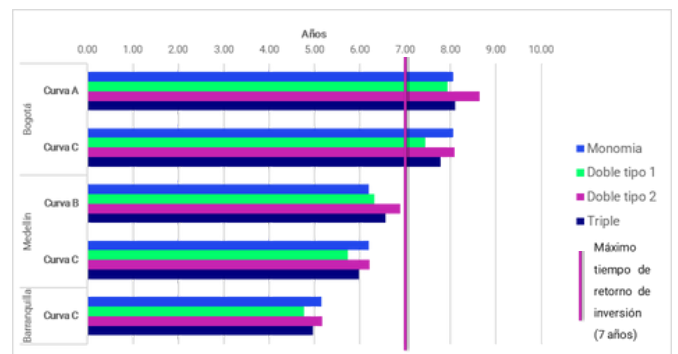


**Figura 24.** Valor presente neto (VPN) de un sistema fotovoltaico de 2.4 kW a una tasa de descuento de 9%

Como se puede observar en la **Figura 24**, para todos los casos, el VPN es positivo y al comparar el resultado por ciudad se puede percibir que a mayor radiación solar, mayor es el VPN. Así mismo, se puede inferir que para los casos donde la tarifa horaria genera ahorros (ejemplo: Medellín, Curva B), el VPN de esa tarifa disminuiría e incluso podría ser inferior al VPN de la tarifa monomía. En la situación contraria, donde la tarifa horaria genera costos (ejemplo: Curva C), el VPN del caso con tarifa horaria aumentaría.

Además de calcular el VPN, se determinó el tiempo de retorno de la inversión simple, es decir, el tiempo necesario que el proyecto debe estar en operación para recuperar la inversión.

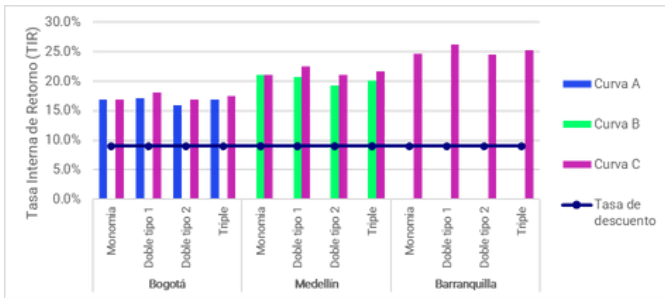
En la **Figura 25** se observa el resultado de este indicador para el sistema fotovoltaico de 2.4 kW por ciudad, por curva de demanda y por tarifa. Para los casos de Bogotá, el tiempo de retorno excede los 7 años de límite deseado, mientras que para las otras ciudades es menor. Sin embargo si el usuario, en lugar de 7 años esperara recuperar su inversión en 5 años, en la mayoría de los casos analizados la instalación no sería factible, excepto en Baranquilla bajo ciertas tarifas horarias.



**Figura 25.** Tiempo de recuperación de la inversión simple para un sistema fotovoltaico de 2.4 kW.



Por último, se calculó la tasa interna de retorno (TIR) la cual es la tasa a la que el VPN es igual a cero para un proyecto de inversión. Si la tasa de descuento es superior a la TIR, el proyecto no es viable. En contraste, si la TIR es superior a la tasa de descuento, el proyecto es viable. En la **Figura 26** se muestra la TIR a 25 años resultante por ciudad, por tarifa y por curva. Todos los resultados se encuentran por encima de la tasa de descuento definida y por ende, todos serían rentables.



**Figura 26.** Tasa interna de retorno para un sistema fotovoltaico de 2.4 kW

### 3.4.2 Factibilidad de los paneles solares con baterías

En esta sección se evalúa la factibilidad del sistema fotovoltaico de 2.4 kW analizado en la sección anterior con una batería de ion-litio de capacidad de 8kWh y potencia de 2 kW. Adicional al costo de los paneles solares se agrega el costo de los componentes de la batería y costos adicionales de operación y mantenimiento. Estos se resumen en la **Tabla 8**.

Paneles solares con baterías	Costos calculados (COP)	Costo total en 25 años, valor presente neto (COP, 2022)
CAPEX (Inversión)	\$28,880,000	\$38,012,794
OPEX (Operación y Mantenimiento)	\$288,800	\$4,835,292

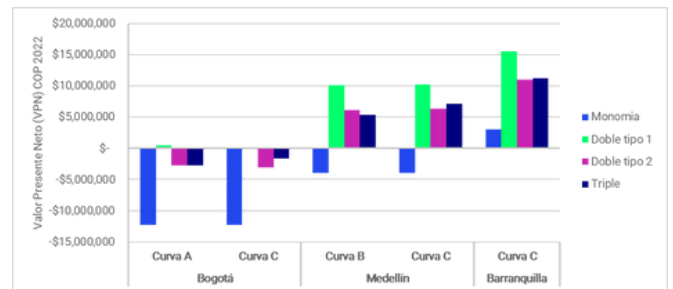
**Tabla 8.** Costos de inversión y operación de los paneles solares con baterías

Bajo los mismos parámetros evaluados anteriormente y considerando una vida útil de 10 años para las baterías, se calcularon los mismos indicadores financieros (el VPN, el tiempo de recuperación simple y la TIR). Se asume que la batería se reemplaza cada 10 años.

A diferencia del escenario anterior, en la **Figura 27** pueden observarse valores negativos de VPN. Esto significa que, bajo ciertas condiciones de tarifa y perfil energético, el usuario no recuperaría su inversión. Es decir, se puede observar que no en todos los casos los sistemas con baterías y uso de tarifa horaria son viables económicamente bajo los supuestos descritos anteriormente.

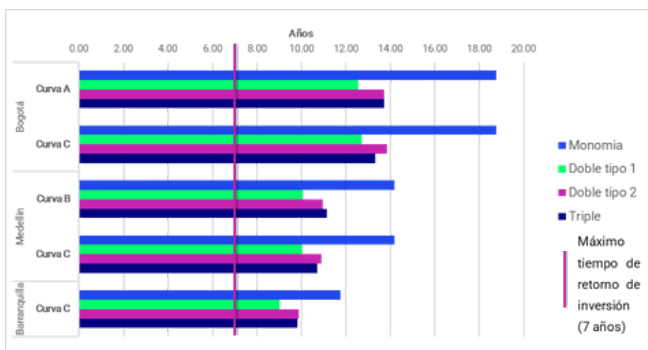
Sin embargo se observa también que en el caso de Medellín y Barranquilla, la presencia de la tarifa horaria es fundamental para cambiar el resultado del VPN de negativo a positivo. Más aún, en todos los casos el VPN aumenta gracias a la presencia de tarifa horaria, siendo siempre mejor el caso de la tarifa Doble tipo 1.

Es importante destacar además, que usuarios residenciales con una alta generación solar, como en el caso de Barranquilla (80% del consumo anual) pueden beneficiarse de las baterías aún con la tarifa monomía, y más aún con tarifa horaria.



**Figura 27.** Valor presente neto para el sistema fotovoltaico con baterías

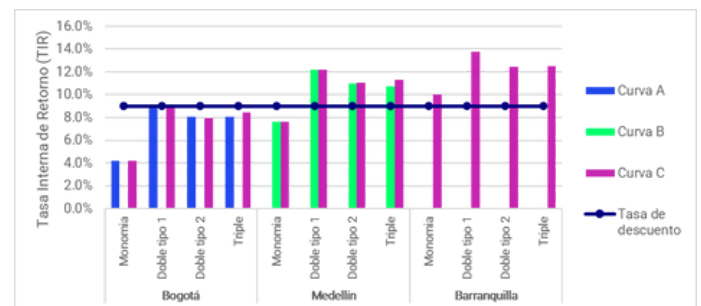




**Tabla 28.** Tiempo de recuperación de la inversión simple para un sistema fotovoltaico con baterías.

En la **Figura 28** se observa el tiempo de recuperación de la inversión para el sistema fotovoltaico con baterías por ciudad, por curva y por tarifa. En contraste con la evaluación de los paneles solares sin baterías, para este escenario ninguna de las curvas analizadas obtiene un periodo de recuperación menor a 7 años. Bajo la lupa de este indicador, ninguno de los casos sería factible por lo tanto.

Por último, se calculó la TIR a 25 años. En la **Figura 29** se muestra la TIR resultante por ciudad, por tarifa y por curva. Al contrario del escenario con paneles solares, cuando se agregan las baterías la TIR demuestra que para ambas curvas en Bogotá bajo cualquier tarifa y para ambas curvas evaluadas en Medellín bajo tarifa monomía no es rentable. Sin embargo, también se aprecia una tasa interna de retorno mayor en todos los casos cuando hay tarifa horaria que cuando hay tarifa monomía.



**Figura 29.** Tasa interna de retorno para un sistema fotovoltaico con baterías

Es importante resaltar que estos resultados son particulares para tres tipos de usuarios residenciales, bajo las tarifas horarias definidas en este estudio, y bajo los parámetros técnicos y económicos definidos. Un cambio en estas variables puede llevar a resultados diferentes, tanto en magnitud como en sentido, cambiando por lo tanto los resultados que se concluyen con estos casos. Por ello, se realizó un análisis de sensibilidad el cual se presenta a continuación.

### 3.4.3 Análisis de sensibilidad de los parámetros financieros

Se realizó un análisis de sensibilidad bajo diversos escenarios para evaluar el impacto tendencial de los parámetros financieros definidos en la rentabilidad de las tecnologías. El análisis se presenta corresponde al caso de paneles solares pues las conclusiones que se obtienen son similares para el caso de una batería.

En la **Tabla 9**, se presentan las variables y sus valores por cada escenario. Se analiza el efecto simultáneo de dos variables, al fijar una variable, por lo que se generan múltiples resultados al combinar todas estas variables.

Escenario / Variable	Tipo de cambio (COP/USD)	Inflación (% anual)	Costo total instalado, "Precio Solar" (USD/kWp)
Alto	4,200	9%	2,100
Referencia	3,800	6%	1,500
Bajo	3,400	3%	900

**Tabla 9.** Escenarios y variables del análisis de sensibilidad

A fin de ejemplificar los cambios en la Curva C aplicada a Medellín y, dado que no hay diferencias significativas entre la rentabilidad de los paneles solares entre los distintos tipos de tarifa, el análisis se limitó a la evaluación de las variables con el uso de la tarifa monomía.

Para esta combinación se obtuvo un valor de 6.2 años para recuperar la inversión y una TIR de 21%. En la **Tabla 10** se muestran los resultados de la sensibilidad de la TIR con respecto a las variables previamente mencionadas. Dos parámetros son variables mientras uno se mantiene constante.

Precio solar 1,500 USD/kWp			Inflación		
			Alto	Referencia	Bajo
			9%	6%	3%
Tipo de cambio	Alto	4,200	22%	19%	16%
	Referencia	3,800	24%	21%	18%
	Bajo	3,400	26%	23%	20%
Inflación 6%			Tipo de cambio		
			Alto	Referencia	Bajo
			4,200	3,800	3,400
Precio Solar	Alto	2,100	14%	16%	17%
	Referencia	1,500	19%	21%	23%
	Bajo	900	30%	33%	36%
Tipo de cambio 3,800 COP/USD			Precio Solar		
			Alto	Referencia	Bajo
			2,100	1,500	900
Inflación	Alto	9%	18%	24%	36%
	Referencia	6%	16%	21%	33%
	Bajo	3%	13%	18%	30%

**Tabla 10.** Análisis de sensibilidad para la TIR bajo distintos escenarios

Al analizar el efecto simultáneo de tipo de cambio e inflación, se puede observar que a menor tipo de cambio y mayor inflación, mayor es la TIR. Esto se debe a que la inflación incrementa el costo de la electricidad, y por lo tanto, hay mayores ahorros con respecto al escenario base.

En la segunda tabla, el impacto simultáneo del precio solar y el tipo de cambio observamos que el escenario con mayor TIR es el que tiene ambos parámetros en nivel bajo. En el tercer cruce, entre inflación y precio solar, se aprecia el mismo efecto que en el primer escenario donde una inflación alta y un precio solar bajo generan la mejor TIR. En general, se puede apreciar que el precio solar es la variable que mayor impacto tiene en el cálculo de la TIR bajo estos escenarios.

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad para el tiempo de recuperación de la inversión simple. Para este indicador financiero, la inflación no entra en la ecuación por lo que no fue considerada. Los resultados se muestran en la **Tabla 11**.

		Tipo de cambio			
		Alto	Referencia	Bajo	
		4,200	3,800	3,400	
Precio Solar	Alto	2,100	9.9	8.9	7.9
	Referencia	1,500	6.9	6.2	5.5
	Bajo	900	4.0	3.6	3.2

**Tabla 11.** Escenarios del análisis para el tiempo de recuperación de la inversión (años)

Se puede observar el mismo efecto que sucede con la TIR, en los escenarios bajos se obtiene el menor tiempo de retorno y, por ende, el mayor rendimiento. Es importante destacar que fijando el precio solar, los años de recuperación varían entre 1 y 2, mientras que cuando se fija el tipo de cambio los años varían entre 2 y 3 aproximadamente por cada escalón.

Finalmente, se evaluó cuál sería la rentabilidad de este proyecto fotovoltaico bajo el escenario de referencia si fuese instalado en un hogar de Medellín con el mismo patrón de consumo pero con un estrato socioeconómico diferente, y por ende, un costo unitario promedio ponderado diferente. Los resultados se muestran en la **Tabla 12**.

Indicador financiero	Estrato Socioeconómico					
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
TIR	15.3%	15.7%	17.3%	17.9%	21.1%	21.1%
Años de recuperación	9.05	8.76	7.86	7.53	6.20	6.20

**Tabla 12.** Impacto del estrato socioeconómico en la rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos



Como se puede observar, a mayor nivel de subsidio, menos atractivo es para los usuarios finales este tipo de proyectos, ya que no perciben el mismo beneficio que los usuarios que pagan contribución. Para este ejemplo, un usuario de estrato E1 tarda aproximadamente 3 años más en recuperar su inversión que un usuario de estrato E6. La discusión sobre los subsidios y su impacto continua en el capítulo 5.

Considerando que el precio solar ha mantenido una tendencia a la baja durante los últimos años, no sería sorprendente que en poco tiempo se estén implementando proyectos en Colombia con tiempos de recuperación de 3 a 4 años para sistemas fotovoltaicos a nivel residencial (con contribución y sin considerar los incentivos fiscales), independientemente de si se implementan esquemas de tarificación horaria o no.

Esta es la misma tendencia que se observa con los costos de las baterías y, aunque no se realizó este análisis de sensibilidad para la tecnología, por los hallazgos discutidos a lo largo de este reporte se puede concluir que son dos los motores que habilitarán proyectos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento: la reducción de costos tecnológicos a nivel internacional y la tarificación horaria a nivel nacional diseñada en beneficio del usuario final y del sistema eléctrico, siendo este último un elemento importante debido al efecto de la batería, como se observó en la sección 3.2

### Principales hallazgos del análisis de factibilidad

Bajo los parámetros y supuestos definidos en este estudio, los paneles solares son rentables para los usuarios residenciales con contribución.

En general, el uso de baterías detrás del medidor aún no es rentable, pero no se descarta que pueda ser rentable en un futuro considerando una reducción del precio de la tecnología, bajo nuevos incentivos y para casos particulares, o bajo ciertos modelos de negocio. La tarificación horaria es clave para generar mayor rentabilidad.



## 4. Impacto del cambio de comportamiento de la demanda

En el capítulo 3 se analizaron los beneficios económicos de la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa horaria. El supuesto más importante consistía en asumir que el usuario final no reaccionaba ante las señales de precio enviadas por una tarifa horaria. A partir de estos supuestos, se analizaron las tarifas bajo las cuales se generaban mayores beneficios. En este capítulo se relaja este supuesto y ahora se asume que el usuario final posee flexibilidad para desplazar su consumo de horas con precios pico a horarios con menores precios, es decir, su patrón de consumo horario se modifica como resultado de las señales de precio transmitidas por una tarifa horaria.

Como resultado del cambio de comportamiento del usuario final ante una tarifa horaria, los beneficios económicos se incrementarían ya que el usuario final obtendría beneficios directos -vía factura, por ejemplo- al trasladar su consumo de periodos con precios altos a periodos con precios menores. La medida en la que el consumidor modifique su consumo, los ahorros podrían incrementarse. El cambio en el consumo eléctrico ante variaciones del precio de la electricidad puede medirse mediante un parámetro conocido como la elasticidad precio de la demanda aplicada de forma horaria. Por definición, la elasticidad precio-demanda busca determinar la capacidad de reacción del consumo frente a variaciones en los precios, considerando la demanda de electricidad.

Una demanda se considera elástica cuando el valor de la elasticidad se ubica por encima de uno, que corresponde a una demanda sensible frente a cambios en los precios, lo que supone una variación del consumo en términos porcentuales, mayor al cambio observado en los precios. En contraste, una demanda se considera inelástica cuando el valor de la elasticidad se ubica por debajo de uno y, por consiguiente, corresponde a una demanda insensible frente a los cambios de precios.

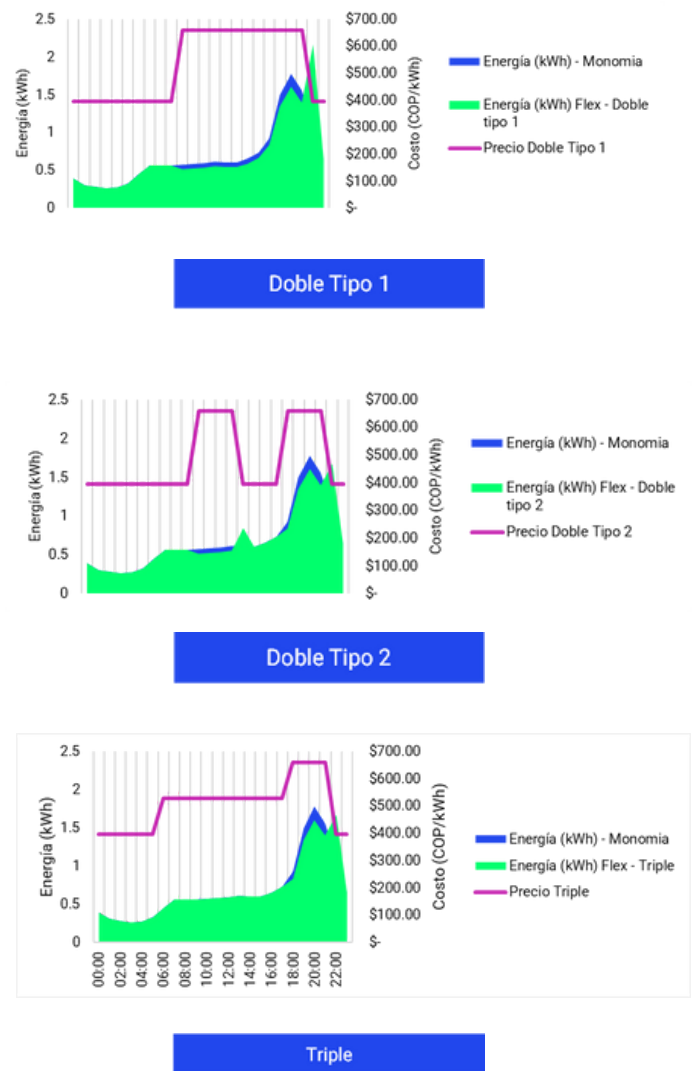
De acuerdo con la UPME, en septiembre de 2017 el mercado regulado mostraba una demanda inelástica que se ubicaba en 0.4. Por su parte la elasticidad del mercado no regulado se ubicaba en 1.43. En conjunto, la ponderación de ambos mercados determinó una elasticidad precio-demanda a septiembre de 2017 de 0.8 (UPME, 2018). En general, estos datos serán tomados como referencia para evaluar los beneficios adicionales que un cambio de comportamiento puede generar en los usuarios finales.

## 4.1 Cambios en la curva de demanda

Para el análisis de los beneficios económicos como resultado de la modificación del patrón de consumo horario por parte de los usuarios, se utilizó el perfil residencial R10 (Curva C), el cual es representativo de los perfiles en Colombia y el que más se asemeja a la curva de demanda nacional.

En la **Figura 30** se presentan tres gráficas donde se compara el cambio de demanda con respecto al escenario base bajo tres escenarios con tarifas horarias distintas (Doble Tipo 1, Doble Tipo 2 y Triple). El perfil de demanda es el mismo en todos los escenarios, sin embargo, reaccionan de forma diferente de acuerdo con las señales de precio enviadas por cada tipo de tarifa.

El área azul representa la curva de demanda típica bajo un esquema de tarifa monomía, mientras que el área verde representa la curva de demanda como respuesta a las señales de precio. De manera ilustrativa, se puede observar que un porcentaje de la demanda se desplaza hacia las horas de menor costo. También se observa que las diferencias de las estructuras tarifarias llevan a una respuesta de diferente forma en la curva de demanda del usuario final. Es importante resaltar que a modo ilustrativo se envía la energía a la siguiente hora más barata disponible, y se considera una elasticidad de 0.4 (ver Anexo A.4) observada en el caso de Colombia.



**Figura 30.** Desplazamiento del consumo energético debido a un cambio de comportamiento, por tarifa horaria

En la siguiente sección se muestran los beneficios económicos producidos por la presencia de una tarifa horaria combinada con un cambio en el comportamiento de la demanda, con respecto al caso de uso de tarifa monomía. Es decir se analiza el impacto de que el usuario final desplace su consumo de energía eléctrica desde la red ante las señales de precio enviadas por las distintas tarifas horarias, y se realiza un análisis de sensibilidad en la flexibilidad de la demanda, es decir en la capacidad del usuario de cambiar su comportamiento de consumo.

## 4.2 Análisis de sensibilidad en la flexibilidad de la demanda

En la sección anterior se abordó un caso particular en el que el usuario final puede modificar su consumo a lo largo del día como respuesta a las señales de precio provistas por la tarifa horaria. Sin embargo, esta respuesta depende de la flexibilidad de cada usuario para redistribuir su consumo a lo largo del día. A mayor flexibilidad para desplazar su consumo, tendrá mayor capacidad para capturar mayores beneficios, pues, en un caso ideal podría consumir sólo en los periodos de menor precio.

A fin de cuantificar los beneficios económicos asociados al cambio de comportamiento de la sección anterior, se analizaron tres escenarios con diferentes grados de flexibilidad (asociado a grados de elasticidad) para usuarios con un perfil energético correspondiente a la Curva C[13].

- Escenario sin cambio de comportamiento (elasticidad = 0)
- Escenario probable, considerando la elasticidad precio-demanda del sector regulado (elasticidad = 0.4)
- Escenario flexible, en el cual el usuario puede cambiar su consumo en la misma proporción en la que lo hacen los precios (elasticidad = 1)

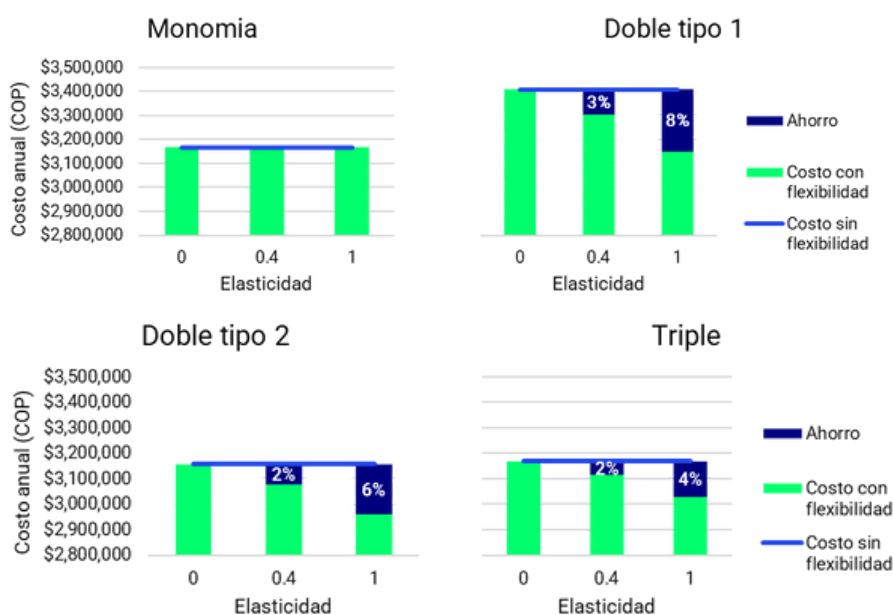
En la **Figura 31** se muestran los beneficios en términos porcentuales de la aplicación de tarifas horarias. Se usa como referencia el caso de la tarifa monomía, la cual no genera ningún incentivo económico al usuario final para cambiar su comportamiento.

Es importante enfatizar que en otros de los casos descritos en el Capítulo 2, se mostró que los usuarios con la Curva C de demanda únicamente percibían un ligero beneficio con la tarifa doble tipo 2 y que eran los más afectados por la tarifa doble tipo 1 y triple. Es decir se observó que un usuario con este perfil energético y con nula flexibilidad para modificar su consumo, podría sufrir un impacto negativo bajo una tarifa horaria Doble tipo 1.

Sin embargo, al incorporar la posibilidad de cambio de demanda, se observa que el mismo usuario con perfil de demanda con curva C podría disminuir los sobre costos producidos por la Tarifa Doble tipo 1, o incluso capturar beneficios económicos adicionales, lo cual puede observarse al comparar los resultados entre la gráficas de tarifa Monomía y de tarifa horaria en la **Figura 31**.

Por otra parte, se observa que la tarifa Doble tipo 1 es la que permite al usuario capturar los mayores beneficios en términos absolutos. Siendo la captura de estos beneficios dependiente en gran medida del nivel de flexibilidad para modificar el patrón de consumo horario.

[13]Se seleccionó la Curva C, a fin de mostrar que el cambio en el comportamiento de los usuarios debido a las señales de precio es determinante para obtener beneficios económicos positivos. Cabe recordar que cuando no se considera un cambio de comportamiento de la demanda, en las secciones anteriores la Curva C, permitiría beneficios apenas mayores a cero.



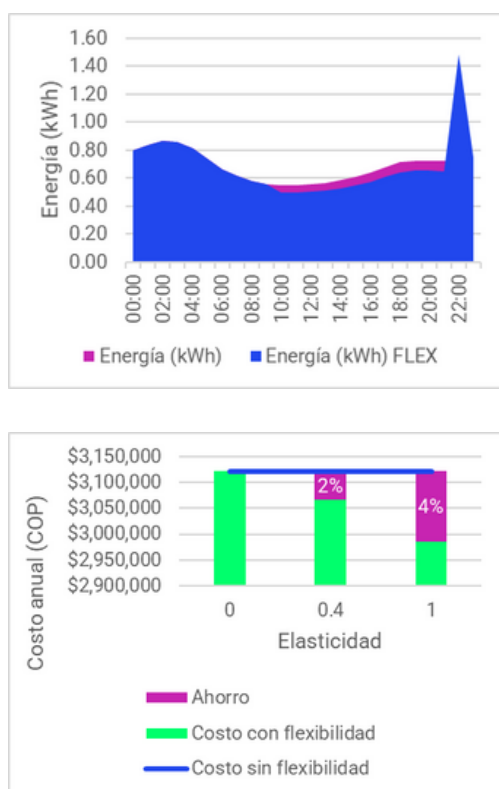
**Figura 31.** Beneficios económicos del cambio de comportamiento, Curva C todas las tarifas.



### 4.3 Análisis agregado del mejor escenario

Como se ha mencionado, el perfil energético analizado en el sector residencial (Curva C) es el que peores beneficios tiene cuando se cambia a una tarifa horaria. Por lo cual, se considera pertinente analizar el caso opuesto, es decir, el que mayores beneficios obtendría de cambiarse a una tarifa horaria. Ese perfil energético residencial es la curva B (R7) como se puede visualizar en la **Figura 5** del capítulo 2.

En caso de presencia de flexibilidad de la demanda, igual que en las curvas anteriores, se puede observar que un porcentaje de la demanda se desplaza hacia las horas de menor costo (en este caso, después de las 10 pm). En la **Figura 32**, se puede ver los resultados del análisis de sensibilidad para los mismos tres escenarios de flexibilidad de la sección anterior, considerando el uso de una tarifa Triple.



**Figura 32.** Desplazamiento del consumo energético y beneficios económicos del cambio de comportamiento, Curva B, Tarifa Triple.

En la **Figura 32** se observa el mismo patrón concluido con el caso del uso de la Curva C, en el sentido del efecto que produce la flexibilidad de la demanda en aumentar el beneficio económico que permite la tarifa horaria. En efecto, solo por el cambio de tarifa monomía a tarifa horaria triple, este tipo de usuario ahorra 9% de su factura eléctrica al año (ver capítulo 2). Si además cambia su comportamiento con base en las señales de precio y considerando la elasticidad del mercado regulado (elasticidad = 0.4), el usuario puede ahorrar un 2% adicional. Por lo tanto, en total el porcentaje de ahorros de ambas acciones le permitiría ahorrar un 11% aprox. de su factura eléctrica.

Es decir se observa que siempre la flexibilidad de la demanda puede aumentar el beneficio para el usuario, y este aumento del beneficio depende del nivel de elasticidad de la demanda.

#### Principales hallazgos del cambio de comportamiento

La combinación de los beneficios del cambio a tarifa horaria más un cambio de comportamiento adicional incrementa los beneficios netos del usuario final.

El cambio de comportamiento, bajo un escenario moderado de elasticidad, puede generar entre un 2% y 3% de ahorro adicional sobre el costo de la tarifa horaria, en el caso de los perfiles de demanda y tarifas estudiados.

# 5. Aspectos relevantes

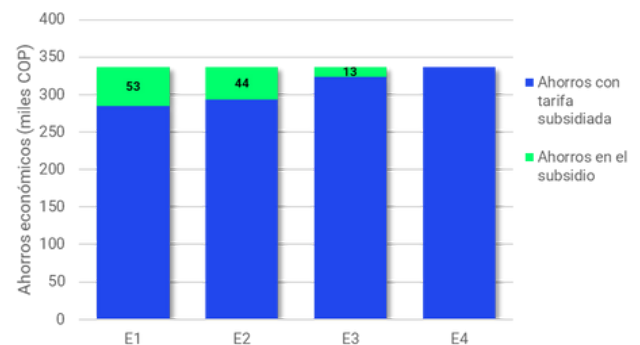
El análisis económico en las secciones anteriores demostró que los subsidios tienen impactos económicos directos en los estratos en el sector residencial, así como en la adopción de tecnologías limpias. La reestructuración del esquema de subsidio representa oportunidades para mitigar estos efectos, así como para impulsar la adopción de tecnologías.

El sistema actual considera un subsidio al consumo en los sectores de menores ingresos en el sector residencial. Sin embargo, la aplicación de una tarifa horaria representa una oportunidad para capturar los beneficios económicos mediante la reducción de subsidios. Este ahorro tiene el potencial de redirirse como un subsidio productivo, es decir, un subsidio a la inversión de paneles fotovoltaicos, por ejemplo. En las siguientes secciones se describen algunas de estas oportunidades.

## 5.1 Subsidios al consumo y subsidios productivos

En la sección 1.2.2 se discutió el caso en el que el Estado tiene la opción de capturar los beneficios, generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía, mediante la reducción de los subsidios, o bien mantener el nivel de subsidios previo a la aplicación de la tarifa horaria para que los usuarios finales capturen esos beneficios (ver **Figura 1**).

En esta sección, se asume que es el Estado quien captura estos beneficios, los cuales provienen de la reducción de los subsidios que debe desembolsar para mantener las tarifas vigentes. Es decir, los usuarios finales no observan ningún beneficio en su factura, ya que se mantienen igual que antes de la aplicación de una tarifa horaria. No obstante, este ahorro en subsidios representa una oportunidad para utilizar estos recursos para acelerar la adopción de tecnologías bajas en emisiones, mediante el financiamiento en la adquisición e instalación de paneles solares. La **Figura 33** muestra los ahorros económicos en el subsidio para los estratos de menor nivel socioeconómico[14]. El ahorro total (área naranja) en estos estratos es de aproximadamente \$ 110 mil entre un usuario en los estratos E1, E2 y E3.



**Figura 33.** Ahorros económicos y ahorros en el subsidio por la aplicación de una tarifa Doble Tipo 2, para el perfil energético de la Curva B.

Se estima que la inversión inicial para la instalación de paneles solares es de aproximadamente dos millones y medio de pesos por kW de potencia (ver Anexo B). Un cálculo muy superficial conduce a que, con base en el ahorro por subsidios y la inversión inicial[15], se podría instalar anualmente un panel solar de un kW de potencia por cada 56 usuarios [16] de estos estratos. De hecho, los usuarios finales beneficiados con la instalación de paneles solares podrían capturar también beneficios mediante los ahorros provenientes por la energía generada mediante los sistemas fotovoltaicos. Es importante resaltar que el escenario analizado es el caso de referencia en el que no hay cambios el patrón de consumo debido a la aplicación de tarifas horarias, por lo que esta proporción podría aumentar si el usuario responde a las señales de precio y desplaza su consumo a horarios de precios bajos.

Si bien bajo este escenario, se asumió que es el Estado quien captura estos beneficios mediante la reducción de subsidios, convirtiendo este ahorro en subsidios productivos para la instalación de paneles fotovoltaicos, también es cierto que el usuario final que se beneficia de la instalación de estos paneles capturará igualmente beneficios debido al ahorro en el pago de energía eléctrica de la red, la cual ahora es generada en sus instalaciones. Se estima que el usuario final podría ahorrarse cerca de 5.8 millones de pesos a valor presente, asumiendo una vida útil de los paneles de 25 años[17].

[14] Se toma como base un usuario con un perfil energético correspondiente a una curva B (ver sección 2.3.2)

[15] Se estimó que la inversión de un sistema de un kW de potencia es de aproximadamente 6.1 millones de pesos. Para mayor detalle ver los resultados del análisis descrito en el Anexo C.

[16] Se calcula a partir de la división de la inversión inicial entre el total de ahorros en subsidios.

[17] Para mayor detalle ver los resultados del análisis descrito en el Anexo C.

## 5.2 Subsidios y adopción de tecnologías

Un aspecto de particular relevancia es el análisis de la interacción de un sistema tarifario con subsidios cruzados y la adopción de tecnologías limpias. En primer lugar, un subsidio a las tarifas eléctricas hace que la instalación de paneles fotovoltaicos sea menos atractiva ya que los beneficios económicos provenientes del ahorro monetario por generar energía eléctrica mediante paneles en lugar de comprar de la energía eléctrica de la red son menores, por lo que su retorno es menor, o incluso negativo.

Sin embargo, para los sectores de mayor nivel socioeconómico podría tener el efecto contrario, ya que a ellos se les cobra un sobreprecio de la tarifa, por lo que tendrían los incentivos -y el ingreso- para la adquisición de paneles fotovoltaicos. Lo cual también, desde un punto de vista social generaría beneficios económicos para estos sectores.

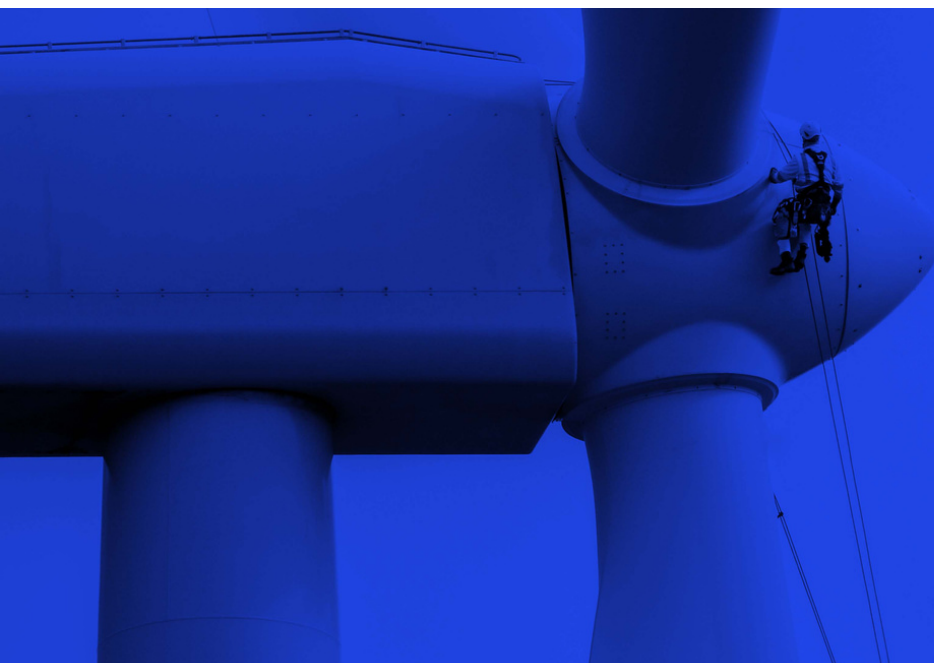
El análisis de los beneficios de este sistema queda fuera del alcance de este reporte; sin embargo, la información generada para este proyecto podría servir como base para estudios cada vez más puntuales que ayude en el diseño de sistemas de tarifas horarias eficientes y con impactos distributivos mínimos.

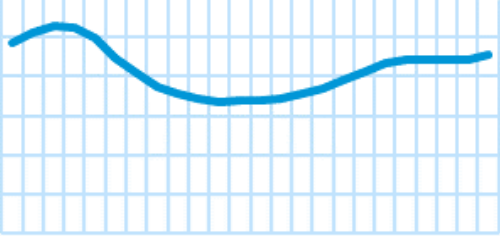
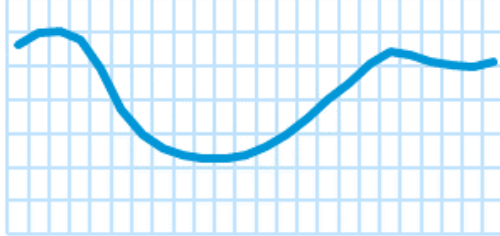
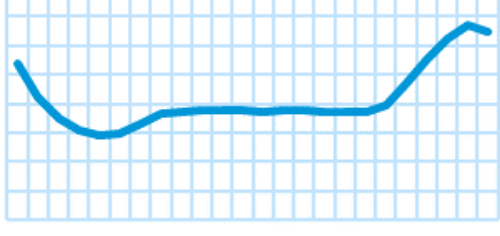
## 5.3 Potenciales pilotos

A lo largo de este reporte se han analizado diferentes perfiles de demanda y los beneficios económicos que diversas intervenciones (cambio de tarifa, tecnologías o cambios de comportamiento) les permitirían obtener. En esta sección se identifican a los tipos de usuarios que son candidatos para instalarles un medidor inteligente si se les aplicara alguna de las tarifas horarias analizadas con el diferencial de precio de +/-25% sobre el costo unitario por el hecho de que obtienen beneficios económicos.

Para el sector residencial se identificaron 3 tipos de usuario que se ven beneficiados con cualquiera de las tarifas horarias analizadas, con ahorros de hasta el 10% de su factura anual.

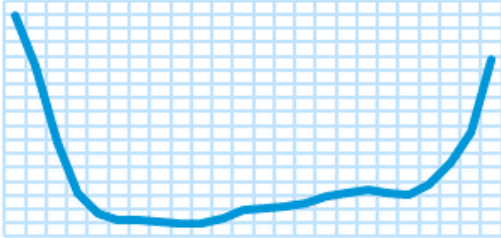
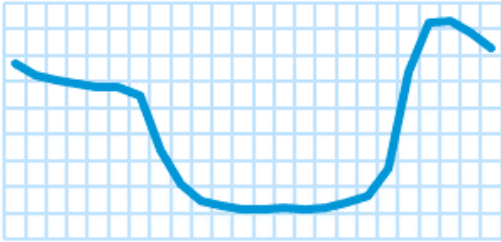
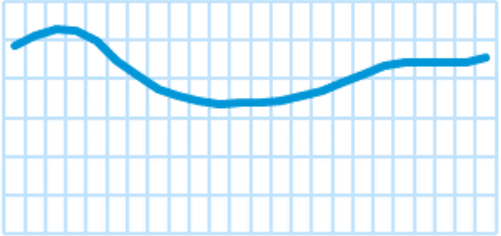
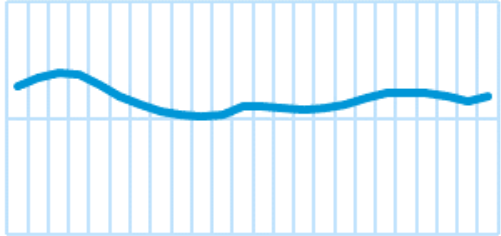
Estos se muestran en la **Tabla 13**, ordenados de mayores a menores ahorros. Como se puede observar, estos son usuarios que consumen más energía durante la noche. Cambiarse a una tarifa horaria puede incentivar a que incrementen su consumo en esas horas y lo disminuyan en las horas del día. Es importante resaltar que dos de las tres curvas de demanda fueron caracterizadas con información de lugares de clima templado.



ID	Gráfica	Ahorro
R7		Doble tipo 1: 2% Doble tipo 2: 9% Triple: 5%
R9		Doble tipo 1: 1% Doble tipo 2: 10% Triple: 5%
R5		Doble tipo 1: 0% Doble tipo 2: 7% Triple: 4%

**Tabla 13.** Candidatos potenciales para cambiarse a tarifas horarias, sector Residencial

Para el sector comercial e industrial, se identificaron 4 curvas que tendrían beneficios por el cambio a cualquiera de las tarifas horarias. Como se puede observar en la **Tabla 14**, estos usuarios también tienen un consumo preponderante en la noche, o bien, un consumo relativamente constante a lo largo del día.

ID	Gráfica	Ahorro
NR5		Doble tipo 1: 2% Doble tipo 2: 9% Triple: 5%
NR2		Doble tipo 1: 1% Doble tipo 2: 10% Triple: 5%
NR7		Doble tipo 1: 0% Doble tipo 2: 7% Triple: 4%
NR8		Doble tipo 1: 0% Doble tipo 2: 8% Triple: 4%

**Tabla 14.** Candidatos potenciales para cambiarse a tarifas horarias

Cabe mencionar que, si el objetivo de la tarifa horaria desde una perspectiva del sistema eléctrico es incentivar un cambio de comportamiento de los usuarios finales, los perfiles con un consumo nocturno tienen menos margen de maniobra para desplazar su consumo a otras horas que los perfiles con un consumo constante a lo largo del día. Por lo tanto, a pesar de poder tener mayores ahorros, serían mejores candidatos para cambiarse primero a medidores inteligentes y a tarifa horaria el segundo grupo.

Es importante mencionar que estos resultados son únicamente aplicables bajo las tarifas horarias analizadas. En caso de que se plantee una tarifa horaria con una estructura temporal y de precios diferente por parte de los comercializadores o los operadores de red, considerando la curva de demanda del área de distribución o del mercado en lugar del país como se realizó en este estudio, es probable que los potenciales pilotos sean diferentes a los detectados en este estudio.

## 6. Conclusiones

**Este reporte aborda los hallazgos más importantes en el análisis de los beneficios económicos generados por la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía en Colombia. Uno de los principales objetivos planteados en el reporte es analizar el impacto diferenciado por perfil energético (curva de demanda), esquema tarifario (tipo de tarifa) y estrato en el sector residencial.**

Una de las principales conclusiones obtenidas se refiere a que las tarifas horarias aplicadas de forma uniforme en todo el país, sin considerar las diferencias en su perfil energético, pueden generar ganadores y perdedores en todos los sectores, por lo que el análisis debe ser más casuístico a fin de determinar el alcance regional, o de acuerdo con el perfil energético a fin de mitigar los efectos negativos en la aplicación de una tarifa horaria.

En cuanto al sector residencial, bajo un escenario de tarifas horarias con beneficios económicos netos, los estratos socioeconómicos de bajos ingresos capturan una mayor proporción de estos beneficios en términos relativos a su ingreso económico. En este sentido, podríamos decir que se trataría de una política progresiva. Sin embargo, el diseño del esquema de tarifas horarias debe considerar que, en los casos de costos netos, podría presentarse lo contrario, y tener resultados regresivos.

**En efecto, a pesar de que en términos absolutos los estratos más altos tienen más beneficios y que en términos relativos la aplicación de tarifas horarias tiene un impacto proporcional en todos los estratos, cuando se evalúan los impactos con respecto al ingreso, los usuarios de menores ingresos son los más beneficiados si la tarifa horaria genera ahorros. Por el contrario, si la aplicación de una tarifa horaria aumenta la factura energética, los estratos de menor ingreso serían los más perjudicados en términos relativos al ingreso.**

Las tarifas horarias que capturan de manera más precisa las fluctuaciones del precio de la energía con los patrones de consumo son las que generan mayores beneficios netos. El reto es el diseño de tarifas que maximice los beneficios. En este estudio se propusieron tres tipos de tarifa siendo las tarifas Doble tipo 2 y Triple las que muestran generar mayores beneficios por su aplicación.

Es importante destacar que el análisis utilizó un escenario conservador como referencia, en el que el usuario no cambia su perfil de consumo en el día; sin embargo, en el grado en que logre adoptar su consumo a las señales de precio, se podrían capturar mayores beneficios económicos lo cual se reflejará en las facturas de los usuarios finales y/o la reducción de los subsidios. En efecto, se concluyó que si el usuario final respondiera a las señales de precio de las tarifas estudiadas, y modificara su comportamiento desplazando parte de su consumo de horas con tarifa punta a horas con tarifa base, podría generar ahorros adicionales al cambio de tarifa.

En cuanto a los escenarios con adopción de tecnologías limpias, se concluyó que si el usuario final instalara tecnologías para reducir su factura eléctrica, en el caso de paneles solares se generarían ahorros totales similares a lo que generan con tarifa monomía debido a la estructura de las tarifas horarias analizadas. Sin embargo, en el caso de combinar paneles con baterías, las tarifas horarias habilitan a las baterías para generar beneficios económicos significativos adicionales al cambio de tarifa. Estos beneficios pueden ser aun mayores si se posibilitan nuevos modelos de negocios (ej. provisión de servicios auxiliares),

**Por último, algunos temas relevantes para un análisis futuro, son las oportunidades para una reestructuración de los subsidios que permitan generar beneficios directos al Estado mediante la reducción de subsidios.**

A este respecto se ha concluido que los subsidios a la tarifa no son un incentivo para la instalación de tecnologías limpias. Además, los subsidios tienen un importante impacto en las finanzas públicas, puesto que el subsidio es una erogación que distorsiona los precios y que podría utilizarse en otros sectores prioritarios.

No obstante, se podría diseñar un esquema de subsidios que permita a los hogares capturar parte de los beneficios, mientras que el Estado podría aligerar sus finanzas públicas. Una oportunidad de este análisis es que podría servir como base para analizar el escenario de redirigir el gasto público al financiamiento de sistemas de autoconsumo de electricidad (ej. paneles solares), es decir, pasar de un subsidio al consumo a un subsidio productivo, es decir a la inversión en sistemas de bajo carbono, tales como los paneles solares.

Incluso podrían proponerse esquemas más avanzados con venta de excedentes de generación a la red, o bien la combinación de paneles solares con sistemas de almacenamiento (baterías) que le brinden mayor flexibilidad al usuario para el consumo horario. Estos sistemas podrían generar beneficios económicos adicionales a los usuarios finales, lo cual podría justificar políticas públicas que fomenten el uso de estas tecnologías.

Una de las oportunidades a futuro que podría utilizar los hallazgos de este reporte, es la ejecución de un proyecto piloto bajo condiciones controladas y monitoreadas que permitan corroborar los hallazgos teóricos encontrados en este estudio.

Por ejemplo, en el sector residencial se podría analizar la respuesta de cada uno de los estratos a las señales de precio provistas por una tarifa de horaria a fin de observar si existen diferencias significativas, estudiar el nivel de respuesta de los usuarios en cuanto a su cambio en hábitos de consumo y corroborar si éstos permiten capturar mayores beneficios económicos esperados.

De manera similar, en el sector comercial e industrial se podría analizar el impacto en la aplicación de tarifas horarias y su interrelación con la implementación de sistemas tecnológicos como paneles solares, baterías y otros sistemas de gestión de demanda y almacenamiento de energía que permitan a la vez entregar beneficios a los usuarios hoy y proveer servicios de flexibilidad a la red en un contexto futuro de red inteligente.



# 7 Anexos

## A. Marco conceptual

### A.1. Estructura de costos: fijo y variable

La composición del precio de la energía eléctrica puede dividirse en dos componentes. Un cargo variable determinado por el costo marginal de suministrar una unidad adicional (kWh) el cual depende del nivel de consumo de los usuarios finales. Y, por otra parte, se encuentra un cargo fijo mediante el cual se cubren los costos restantes por proveer el servicio eléctrico, independientemente del nivel de consumo de los usuarios finales.

Un precio eficiente de la electricidad es aquel en el que se cumple que el pago por una unidad adicional de energía es igual al costo marginal de suministrarla. El costo variable de suministro de energía eléctrica comprende los costos de generación y transmisión (congestión), el cual varía a lo largo del día; es decir, el costo marginal por suministrar una unidad adicional de energía para satisfacer el cambio en la demanda de electricidad.

De forma simplificada, se puede afirmar que el costo de generación de la energía eléctrica depende de la infraestructura que debe estar lista para que entre en funcionamiento cuando la demanda llega a un pico. Esta capacidad instalada comprende las centrales de generación de base y punta, siendo estas últimas las que se ponen en operación en los periodos de máxima demanda. Ya que estas operan de manera intermitente, sus costos unitarios son mayores, lo cual ocasiona que el costo unitario de generación en periodos de punta sea más alto.

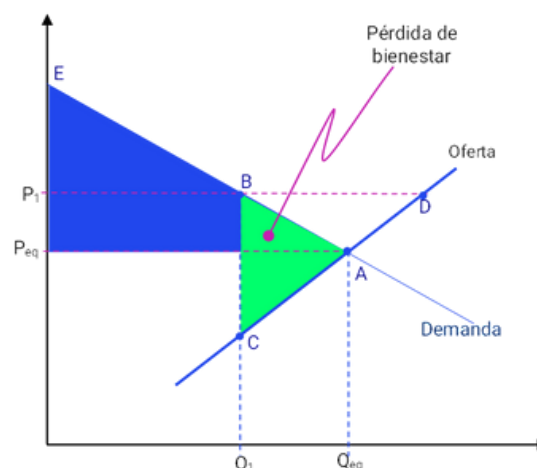
En la mayoría de los sistemas tarifarios, este costo marginal se considera como un valor promedio a lo largo del día y el año. Si bien este costo puede, en promedio, cubrir los costos de generación eléctrica no es un sistema eficiente. Las principales implicaciones de este sistema se discuten en las siguientes secciones de este anexo.

### A.2. Distorsiones en el mercado

En el apartado anterior se describió que los sistemas tarifarios típicos están basados en un costo variable (\$/kWh) que permanece constante a lo largo del día. Sin embargo, se trata de un costo de suministro que puede variar considerablemente a lo largo del día, en particular, debido a la utilización de la capacidad de punta para satisfacer la demanda en periodos de punta.

Desde un punto de vista económico, un sistema tarifario con estas características no provee las señales de precios que den cuenta de estos costos dinámicos, por lo que las decisiones de consumo son independientes de la variación de estos costos. Esto ocasiona que las decisiones de consumo sean ineficientes, ya que existen periodos en los que el costo marginal excede la tarifa, o bien es menor a ésta (ver **Figura 3**).

La **Figura 34** muestra la pérdida del bienestar del consumidor en la presencia de distorsiones en el mercado que ocasionan que la fijación del precio no coincida con el precio de equilibrio. En la figura puede observarse que las curvas de oferta y demanda se cruzan en el punto A, el cual corresponde al precio de equilibrio ( $P_{eq}$ ). Bajo un mercado competitivo el precio de un bien corresponde al costo marginal de bien o producto, es decir, el costo adicional por producir una unidad adicional. Al precio  $P_{eq}$ , el consumo eficiente es  $Q_{eq}$ , el consumo en cualquier otro punto lleva a una pérdida del bienestar.



**Figura 34.** Pérdida de bienestar del consumidor asociada al consumo de un bien, dado un precio distinto al precio de equilibrio.

**Lo anterior está asociado a la pérdida de bienestar tanto del consumidor como del productor. El área comprendida entre los puntos A – B – C corresponde a la pérdida total ocasionada por la fijación de un precio (P1) superior al precio de equilibrio. Esta pérdida del bienestar sucede igualmente en el caso contrario, es decir, cuando se fija un precio menor al precio de equilibrio. En este caso se genera un exceso en el consumo del bien, al cual también existe una pérdida de bienestar.**

De esta manera, mediante la remoción de las distorsiones del mercado para que el precio regrese a los niveles del precio de equilibrio (Peq) se eliminarán las pérdidas de bienestar y el equilibrio se restablecerá, asegurando con ello un consumo eficiente. En la siguiente sección, se describen las principales implicaciones de un sistema tarifario que distorsiona estos precios.

### A.3. Tarifas y eficiencia económica

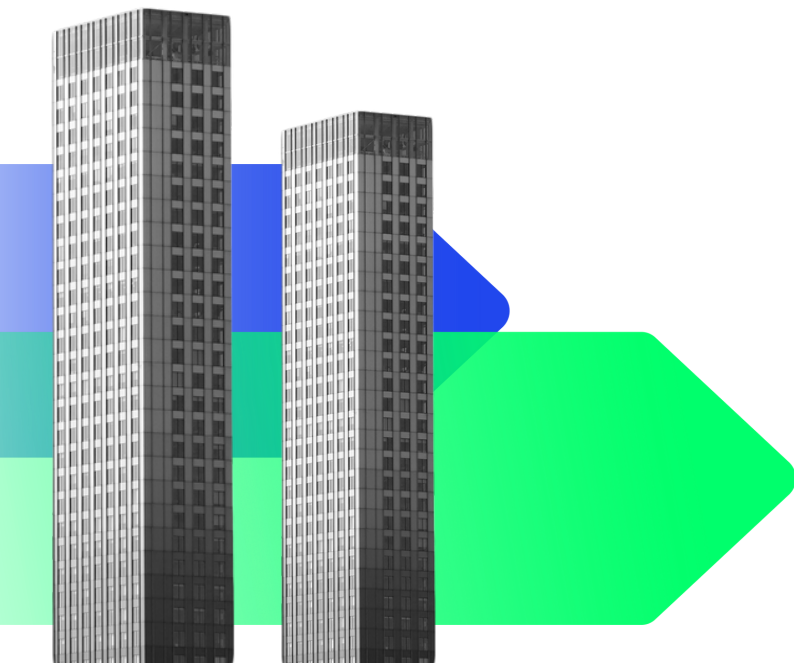
La sección anterior describió las ineficiencias asociadas en el consumo de un bien como resultado del establecimiento del precio de un bien distinto al de equilibrio como resultado de distorsiones presentes en el mercado. Esto es importante cuando se analiza la conveniencia de establecer una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía.

En la **Figura 3** puede observarse como el precio de la energía eléctrica varía durante el día. En ella se observan periodos en los cuales el precio de la energía es bajo (0:00 a 10:59 am), intermedio (11:00 a 16:59 y 21:00 a 23:59) y alto (17:00 a 20:59). El establecimiento de una tarifa monomía, es decir, de una tarifa que se mantiene constante a lo largo del día, es que prácticamente existen periodos en los cuales la diferencia entre el precio y la tarifa son significativos.

Tal como se discutió en el apartado anterior, en los periodos en los que el precio de equilibrio (precio de la energía) es menor al precio fijado (tarifa), existe una pérdida de bienestar ya que los usuarios finales consumen menos energía que el nivel óptimo. Mientras que en el caso de que el precio de la energía es mayor al de la tarifa, los usuarios finales consumirán más que el nivel de consumo óptimo. En cualquiera de los dos casos, existe una pérdida de bienestar tanto para el productor como para el consumidor, lo que ocasiona que el consumo de la electricidad no sea eficiente a lo largo del día.

Uno de los objetivos de las tarifas horarias es capturar con mayor detalle las fluctuaciones de los precios de la energía eléctrica. Las tarifas horarias pueden ser tan dinámicas que representen intervalos de tiempo como sea posible. Por simplicidad del sistema, comúnmente la división se hace mediante escalones que puede ir desde una hasta varias horas.

Desde un punto de vista económico, el objetivo de un esquema tarifario horario es que las diferencias entre el precio de la electricidad y la tarifa horaria se minimizan, por lo que la tarifa horaria capturaría con mayor detalle las fluctuaciones precio de equilibrio durante el día, por lo que las distorsiones en el consumo ocasionadas por la diferencia entre el precio de la electricidad y la tarifa disminuirían. Esto puede observarse también en la **Figura 3**, en donde la línea punteada muestra una tarifa horaria que captura mejor los periodos bajo, intermedio y alto del precio de la electricidad, de esta forma se tendría un sistema más eficiente al mitigar las distorsiones ocasionadas por una tarifa monomía.



#### A.4. Incentivos vía precio y cambio conductual de las y los usuarios

Por el momento se ha discutido la conveniencia de la aplicación de una tarifa horaria en sustitución de una tarifa monomía, debido a su capacidad por capturar con mayor detalle las fluctuaciones del precio de la electricidad a lo largo del día. Sin embargo, el aspecto de mayor relevancia es su potencial para modificar el patrón de consumo de los usuarios finales a lo largo del día.

La tarifa horaria busca proporcionar incentivos, mediante señales de precio, para que los consumidores tomen decisiones de consumo de acuerdo con el precio de la energía eléctrica. De manera que, mediante una tarifa horaria, el usuario final identifica aquellos periodos en los que el precio de la energía eléctrica es bajo y aquellos periodos en los que el precio es alto.

Un consumidor racional y flexible desplazaría parte de su consumo desde los periodos en los que el precio de la electricidad es alto hacia aquellos periodos en los que el precio de la electricidad es más bajo. En este sentido, el sistema incrementa la eficiencia pues el consumo, basado en la tarifa horaria, estaría más cerca del nivel de demanda eficiente (ver **Figura 34**), por lo que la pérdida de bienestar disminuiría. Además, parte de estos excedentes los podría capturar el usuario final mediante la factura ya que el consumo se desplazaría desde los periodos de precios altos de la energía hacia periodos con un menor precio, por lo que el pago de la factura podría disminuir.

Sin embargo, existe un aspecto que debe considerarse en el diseño de tarifas ya que tiene un impacto directo en la captura de los beneficios económicos al sustituir una tarifa monomía por una tarifa horaria. El grado en el que los usuarios finales respondan a las señales del precio dependen de la flexibilidad para que el usuario pueda cambiar su patrón de consumo a lo largo del día. A esto se le conoce como elasticidad precio de la demanda, que significa el porcentaje de cambio en el consumo debido al incremento de uno por ciento en el precio. La elasticidad precio es negativa ya que, ante un aumento en el precio, el consumo disminuye y viceversa.

**La elasticidad precio de la demanda, en términos formales se define como el cambio porcentual de la demanda ante un cambio de uno por ciento en el precio:**

$$\varepsilon = \frac{\text{Cambio porcentual de } Q}{\text{Cambio porcentual de } P} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q}}{\frac{\Delta P}{P}} = \frac{\Delta Q}{\Delta P} \frac{P}{Q}$$

Donde P representa el precio y Q la cantidad.

La capacidad de los usuarios finales para desplazar su consumo a lo largo del día no sólo depende del precio, sino también de la configuración de los hogares, por ejemplo. Si los hogares están constituidos por empleado que salen a trabajar, difícilmente podrán modificar su consumo en horas que están fuera de casa.

Por otra parte, en el sector comercial, dadas las horas de actividad comercial es en horas determinadas, su modificación de los patrones de consumo también dificulta desplazar el consumo. En este sentido, uno de los aspectos más importantes es analizar el impacto de la elasticidad en la modificación de los patrones de consumo.

## B. Contexto colombiano

### B.1. Estructura tarifaria

La **estructura tarifaria** por el servicio de energía eléctrica en Colombia está dictada por la **Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)**. Las resoluciones que rigen los subsidios y tarifas para el servicio de electricidad se aplican en todo el país y comprenden diferentes esquemas para las zonas interconectadas y las zonas no interconectadas.

El costo del servicio y el precio que pagan los distintos usuarios se le conoce como estructura tarifaria. Esta tarifa es el resultado de sumar los costos de cada una de las etapas de la cadena de valor de la electricidad.

Fórmula:

$$\text{Generación} + \text{Transmisión} + \text{Distribución} + \text{Comercialización} + \text{Pérdidas} + \text{Restricciones} = \text{CU} \left( \frac{\$}{\text{kWh}} \right)$$



En donde:

- *CU*: Costo Unitario de prestación del servicio (\$/kWh)
- *G*: Costo de compra de energía (\$/kWh)
- *T*: Costo por uso del sistema de transmisión nacional (\$/kWh)
- *D*: Costo por uso del sistema de distribución (\$/kWh)
- *Cv*: Margen de comercialización correspondiente (\$/kWh)
- *PR*: Costos de pérdidas de energía, transporte y reducción de las mismas (\$/kWh)
- *R*: Costo de restricciones y servicios asociados con generación (\$/kWh)

El cálculo de cada uno de estos componentes se encuentra regulado y su valor mensual es cambiante, principalmente por la fluctuación ocasionada en el **costo D asociado a los cargos regionales de distribución denominados ADD**. Por ende, al usuario final se le comunican los precios a pagar después de su consumo.

### B.2. Tarifas actuales

De acuerdo con la regulación vigente en Colombia, la comercialización de energía eléctrica es una actividad considerada en competencia y dentro de cada mercado de comercialización existen diferentes condiciones que imposibilitan la comparación entre estos; por ejemplo, la ubicación, el clima, la infraestructura, etc. La **Figura 35** presenta de forma resumida las variables que se analizarán en esta sección.

Actualmente, en Colombia existen dos mercados tarifarios: el **mercado regulado** y el **mercado no regulado**. En el mercado regulado se encuentra concentrados casi la totalidad de usuarios del país. Es directamente contratado y servido por compañías de distribución, abarca usuarios industriales, comerciales y residenciales con demandas de energía inferiores a 55 MWh/mes. En este mercado, la estructura de tarifas es establecida por la agencia reguladora CREG. La fórmula de cobro es aprobada por el regulador, y cualquier usuario es atendido sin importar su consumo.

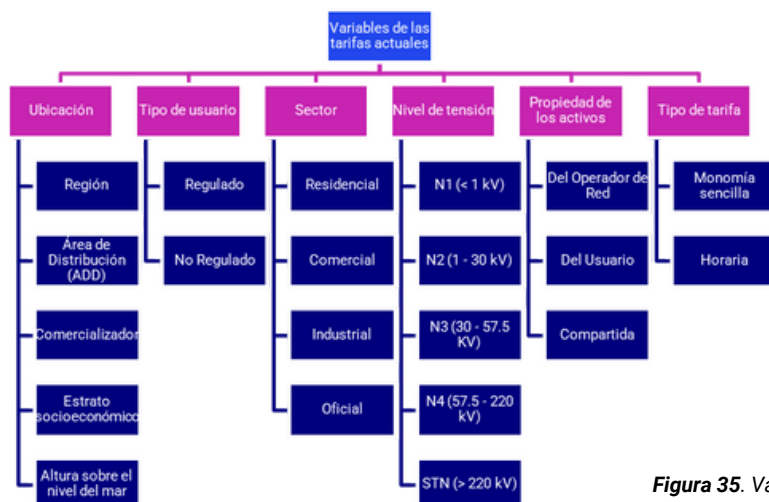


Figura 35. Variables a considerar de las tarifas actuales.

### Tarifas reguladas: Sector Residencial

El sector residencial cuenta con el 91,42% de medidores instalados a nivel nacional, clasificados por estrato socioeconómico donde la mayor proporción pertenece a los estratos 1, 2 y 3 quienes representan el 88% de usuarios residenciales. El consumo de energía promedio para este sector en el año 2019 corresponde al 67% de la demanda nacional de energía eléctrica de acuerdo con la información reportada al Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI, 2021).

Para el sector residencial, las tarifas están ajustadas con base en el **estrato socioeconómico** en el que esté ubicada la vivienda. Según el Departamento de Planeación Nacional, existen seis estratos socioeconómicos en los que se pueden clasificar las viviendas o los predios, los cuales se describen en la **Tabla 15**.

Estrato	Nivel Socioeconómico	Significado e Impacto
E1	Bajo – Bajo	Las personas que habitan viviendas pertenecientes a los niveles 1, 2 y 3 son clasificados como de estrato bajo, por lo que estas personas son las que reciben mayores beneficios y ayudas socioeconómicas, incluyendo descuentos en la tarifa eléctrica.
E2	Bajo	
E3	Medio – Bajo	
E4	Medio	Las personas que habitan viviendas que pertenecen a este nivel no reciben mayores ayudas en pagos, pero tampoco pagan sobrecostos. Se considera como la tarifa de referencia.
E5	Medio – Alto	Las personas en viviendas de los estratos 5 y 6 pagan los servicios públicos más costosos, además de otros sobrecostos de "contribución al estado". En el caso de la tarifa eléctrica, estos estratos pagan un 20% de sobrecosto.
E6	Alto	

**Tabla 15.** Descripción de los estratos socioeconómicos.

Los subsidios que se aplican a los estratos 1, 2 y 3 son únicamente de un rango de consumo de 0 kWh al denominado **consumo de subsistencia (CS)**, el cual es "la cantidad mínima de electricidad utilizada en un mes por un usuario típico para satisfacer necesidades básicas que solamente pueden ser satisfechas mediante esta forma de energía final". En 2004, mediante la resolución 0355, la UPME lo fijó basado en la altura de los municipios y se muestra junto con algunos municipios en la siguiente tabla (**Tabla 16**):

Altura	CS	Ej. Municipios
< 1000 msnm	173 kWh/mes	Barranquilla Cartagena
> 1000 msnm	130 kWh/mes	Bogotá (2625 m) Medellín (1500 m) Cali (1018 m)

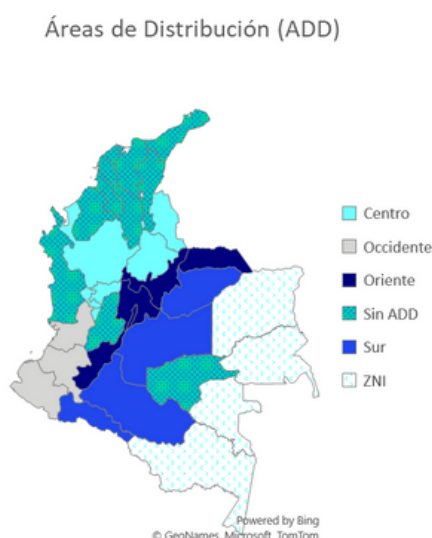
**Tabla 16.** Consumo de subsistencia basado en la altura.

Los estratos 1, 2 y 3 reciben de subsidio máximo un 60%, 50% y 15%, respectivamente. Una vez que rebasan este límite del consumo de subsistencia, se les aplica el costo del estrato 4, el cual es el costo unitario de referencia. En contraste, los estratos 4, 5 y 6 no reciben ningún subsidio. Al contrario, los estratos 5 y 6 están obligados a pagar una contribución adicional del 20% sobre el costo unitario de la electricidad.

Las áreas comunes en conjuntos residenciales son espacios que benefician a sus habitantes y su operación y mantenimiento está a cargo de los copropietarios o administradores del conjunto habitacional. Ejemplos de estas áreas incluyen alberca, gimnasio, zona de asadores, salones sociales, entre otros. Al igual que las viviendas del sector residencial, las áreas comunes se dividen por estratos asociados al conjunto habitacional al que pertenecen. Por ejemplo, si las viviendas son clasificadas como parte del estrato 2, sus áreas comunes también son parte de este estrato. Los estratos 1 a 4 pagan lo mismo mientras que los estratos 5 y 6 también pagan un 20% de sobrecosto. Así mismo, la tarifa será mayor si los activos de distribución son propiedad del distribuidor en lugar del cliente.

Además, la tarifa eléctrica de los usuarios dependerá de la **propiedad de los activos de la red de distribución**. Si el operador paga todo lo que tiene que ver con el transformador y la red de nivel 1, el OR es el propietario. Cuando se hacen fraccionamientos, o conjuntos residenciales, etc., donde el desarrollo inmobiliario fue quien puso esos cables de distribución y transformadores, entonces es propiedad del cliente. En propiedad compartida se asume un 50:50 del OR e inversión privada. Dependiendo de cual modalidad esté el sistema de distribución, existirán diferentes cargos de distribución.

Al final, es **la ubicación del centro de carga que determina las opciones que tiene el usuario final de comercializadores**, ya que las empresas suministradoras no operan en todas las regiones del país. Por ley se establece que debe existir un cargo único por nivel de tensión por cada Área de Distribución (ADD). La mayoría de las empresas suministradoras se pueden agrupar de acuerdo con su ADD (Centro, Occidente, Oriente, Sur), aunque existen 5 empresas que no pertenecen a ninguna (Sin ADD).



**Figura 36.** Áreas de distribución (ADD) de Colombia

La ubicación y la propiedad son dos variables que pueden tener un impacto considerable en el costo unitario de prestación de servicio, cuyo componente de distribución (D) es uno de los que mayor influencia tiene en el costo unitario de la energía. A continuación, se presenta un ejemplo de las tarifas de energía eléctrica reguladas del sector residencial que cobra la empresa ENEL-CODENSA en el área de Bogotá-Cundinamarca para el mes de mayo de 2021.

SECTOR RESIDENCIAL NIVEL DE TENSIÓN 1				
ESTRATO (E)	RANGO DE CONSUMO (kWh-mes)	PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh)	PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh)	PROPIEDAD COMPARTIDA (*) (\$/kWh)
E1	0-CS (+)	229,3407	213,7904	222,0570
	Más de CS	573,3518	534,4759	555,1426
E2	0-CS (+)	286,6759	267,2380	277,5713
	Más de CS	573,3518	534,4759	555,1426
E3	0-CS (+)	487,3490	454,3045	471,8712
	Más de CS	573,3518	534,4759	555,1426
E4	Todo consumo	573,3518	534,4759	555,1426
E5	Todo consumo	688,0222	641,3711	666,1711
E6	Todo consumo	688,0222	641,3711	666,1711

(+) CS: Consumo de Subsistencia

**Figura 37.** Costo unitario del sector residencial, ENEL-CODENSA mayo 2021



### Tarifas reguladas: Sector Comercial, Industrial y Oficial

Además de las tarifas residenciales, existen tarifas para el sector comercial e industrial. El 95% de los usuarios no residenciales tienen una tarifa regulada. Para las tarifas reguladas para el sector comercial, industrial y oficial también se calculan con el costo unitario de prestación del servicio. Los precios se ajustan dependiendo del esquema horario seleccionado, del nivel de tensión al cual está conectado el usuario y, en caso de estar en nivel de tensión 1, también se considera la propiedad de los activos de distribución. Además, como con los usuarios residenciales de estrato socioeconómico 5 y 6, las empresas deben pagar una contribución de 20% sobre el costo total del servicio, a menos de que estén exentos, como los usuarios del sector oficial. Las tarifas finales pueden ser monomías sencillas, es decir, una tarifa fija que paga únicamente el costo unitario de la electricidad; u monomías horarias si el suministrador de electricidad ofrece esta modalidad, las cuales se analizarán más a detalle en la sección 2.3.

### Tarifas no reguladas

En el mercado no regulado participan voluntariamente la industria y todos aquellos usuarios que tengan un alto consumo de energía. Actualmente un usuario no regulado es un consumidor con demandas de energía superiores o iguales a 55 MWh /mes. A diferencia del regulado, el precio de comercialización y generación se pacta libremente mediante un proceso de negociación entre el consumidor y el generador.

Frente a los componentes regulados de la tarifa de energía eléctrica para usuarios no regulados, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios vigila que las partes del contrato sólo puedan negociar los componentes de Generación y Comercialización.

Los usuarios no regulados son reportados trimestralmente por XM, el operador del sistema y el administrador del mercado. Para el trimestre de abril a junio 2021, se contabilizaron 5,936 usuarios no regulados, distribuidos en los distintos departamentos de Colombia que tienen conexión al sistema interconectado nacional. Esto representa el 4.33% de los usuarios no residenciales y el 0.15% del total de suscriptores. En los niveles de tensión 1, 2 y 3 se encuentran el 98.5% de los usuarios no regulados, siendo industrias pesadas los 90 usuarios conectados al nivel de tensión 4 y al sistema de transmisión nacional.

Nivel	Rango de Tensión	Número de Usuarios
Nivel de Tensión 1	N1 < 1 kV	418
Nivel de Tensión 2	1 kV <= N2 < 30 kV	4,175
Nivel de Tensión 3	30 kV <= N3 < 57.5 kV	1,253
Nivel de Tensión 4	57.5 kV <= N4 < 220 kV	83
Sistema de Transmisión Nacional	STN >= 220 kV	7

Tabla 17. Número de usuarios no regulados por nivel de tensión

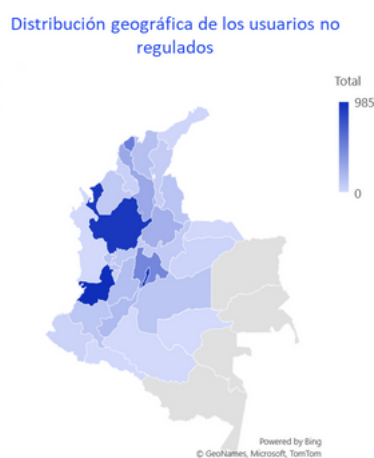


Figura 38. Distribución geográfica de los usuarios no regulados

### B.3. Tarifas horarias disponibles

La resolución **CREG 079 de 1997** permite a las empresas comercializadores establecer costos monomios con diferenciación horaria, o bien, tarifas de tiempo de uso de naturaleza estática. Algunos usuarios regulados no residenciales (industrial y comercial) tienen acceso, de forma voluntaria, a tarifas horarias reguladas que dependen de la oferta del suministrador contratado y de su ubicación.

El Capítulo 9 de la Resolución **CREG 015 de 2018** define los criterios para determinar los bloques horarios. Los bloques se definen con base en la carga máxima de la curva de carga. Además, el mismo capítulo define la ecuación para calcular los cargos horarios, que incluye la consideración de un factor de cargo horario (fch) para ampliar la diferencia entre bloques horarios.

**Existen cuatro tipos de tarifa horarias utilizadas en Colombia.** Todas tienen un régimen de precios estático. Los precios están ajustados con base en el costo unitario de la ubicación correspondiente. Tres de los cuatro tipos de tarifas horarias se presentan en la **Tabla 18**.

Tipo de tarifa	Periodo	Horas	Gráfica de ejemplo
Tarifa horaria doble tipo 1	Fuera de pico / Fuera de punta	00:00 a 17:00 22:00 a 24:00	
	Hora pico / hora punta	17:00 a 22:00	
Tarifa horaria doble tipo 2	Fuera de pico / Fuera de punta	00:00 a 09:00 12:00 a 18:00 21:00 a 24:00	
	Hora pico / hora punta	09:00 a 12:00 18:00 a 21:00	
Tarifa horaria triple	Base / Mínima	00:00 a 4:00 23:00 a 24:00	
	Intermedio / Media	04:00 a 09:00 12:00 a 18:00 21:00 a 23:00	
	Punta / Máxima	09:00 a 12:00 18:00 a 21:00	

**Tabla 18.** Tarifas horarias (dobles y triples)

Tipo de tarifa	Mercados (ENERTOTAL)	Periodos horarios (horas)							
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Múltiple (5)	Cali, Valle, Bogotá, Boyacá, Caribe Mar,		05:00-						
	Caribe Sol,	00:00-	10:00,	10:00-	19:00-	22:00-			
	Cartago,	05:00	13:00-	13:00	22:00	00:00			
	Pereira,		19:00						
	CETSA, Santander, Huila								
Múltiple (6)	Cauca	00:00-	05:00-	06:00-	10:00,	19:00-	22:00-		
	Caldas	05:00	06:00	13:00-	10:00-	13:00	22:00	23:00	
	Tolima			19:00,	23:00-				
Múltiple (7)	Antioquia	00:00-	05:00-	06:00-	10:00,	19:00-	21:00-	22:00-	
	Cauca	05:00	06:00,	10:00,	10:00-	21:00	22:00	23:00	
			23:00-	13:00-	13:00	21:00	22:00	23:00	
Múltiple (8)	Nariño	00:00-	05:00-	06:00-					
		05:00	06:00,	09:00,	09:00-	10:00-	19:00-	21:00-	22:00-
			15:00-	15:00,	10:00	13:00	21:00	22:00	23:00
		23:00-	17:00-						
		24:00	19:00						

Ejemplo (Tarifa horaria Múltiple 8)

Hora del día	COP/kWh
0	\$680.00
1	\$680.00
2	\$680.00
3	\$680.00
4	\$690.00
5	\$690.00
6	\$690.00
7	\$690.00
8	\$690.00
9	\$690.00
10	\$695.00
11	\$695.00
12	\$695.00
13	\$690.00
14	\$690.00
15	\$690.00
16	\$690.00
17	\$690.00
18	\$690.00
19	\$700.00
20	\$700.00
21	\$700.00
22	\$680.00

**Tabla 19.** Tarifas horarias múltiples

Elaboración propia a partir de datos de ENERTOTAL en mayo de 2021.

El diferencial de precio entre las horas punta y horas fuera de punta es un criterio importante para analizar. Como se puede observar en las gráficas de las tablas anteriores, para el ejemplo de tarifa doble tipo 1, el precio está entre \$630 y \$645 COP por kWh, para la tarifa doble tipo 2 entre \$621 y \$624; para la tarifa triple va de \$618 a \$624 y para la tarifa horaria múltiple de 8 periodos va desde \$678 a \$700. Considerando un promedio entre ambos precios como el costo unitario de referencia, el incremento o disminución del precio para cada tarifa sería el siguiente: 1.17% para la tarifa doble tipo 1, 0.24% para la tarifa doble tipo 2, 0.48% para la tarifa triple, y 1.59% para la tarifa múltiple de 8 periodos.

Estos porcentajes son muy pequeños en comparación con otras tarifas internacionales. Por ejemplo, en Reino Unido la tarifa "Economy 7" tiene un precio de noche de 9.76p/kWh y de día un precio de 20.03p/kWh. Realizando el mismo cálculo que se hizo con los ejemplos anteriores, el porcentaje de diferencia sobre el promedio es de 34.47%, lo cual incentiva a generar cambios de comportamiento en el usuario final. En México, el cargo horario para usuarios industriales de gran demanda va de 0.95 a 1.90 MXN/kWh, por lo que el porcentaje de diferencia es del 33.3% sobre el promedio.

Regresando a Colombia, para todas las tarifas con diferenciación horaria, el costo unitario monomio para cada período horario se calcula con la misma fórmula general de costo definida en la Resolución CREG 031 de 1997 y presentada al inicio del capítulo, junto con el costo de comercialización aprobado a cada prestador del servicio. La diferencia radica en que para el cálculo se utilizan los costos promedios mensuales ponderados de cada período horario para los componentes de generación, transmisión, distribución, restricciones y servicios complementarios. De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), Colombia cuenta con 30 mercados regulados divididos por zonas geográficas. De esos mercados eléctricos, el 73% tiene al menos un comercializador que ofrece una Tarifa horarias (**Tabla 20**). Menos una, todas dirigidas al sector industrial y comercial.

	Centro	Oriente	Occidente	Sur	Sin ADD
Mercados con al menos una opción de tarifa horaria	6/7	3/4	6/7	3/6	4/6
Mercados sin opción de tarifa horaria	Ruitoque	Arauca	Popayan Purace	Bajo Putumayo Putumayo Sibundoy	Chocó Guaviare

**Tabla 20.** Tarifas horarias en Áreas de Distribución y Mercados

La minoría de las empresas comercializadores (12 de las 38 empresas analizadas) ofrecen una tarifa de tiempo de uso, siendo solo una que las ofrece a usuarios residenciales. Por lo general, son varias empresas que ofrecen tarifas horarias en otros mercados, aunque solo cinco de estas empresas tienen presencia en más de 3 de los 30 mercados regulados. El resto tiene presencia únicamente en uno de los mercados. En la **Tabla 21** se detalla la oferta de tarifas horarias disponibles por tipo y por empresa. Las que operan tarifas horarias en un mercado y están presentes en más, también ofrecen tarifas horarias.

Empresa	Número de Mercados	Tipo de tarifa horaria			
		Doble Tipo 1	Doble Tipo 2	Triple	Múltiple
RENOVATIO	21			x	
DICEL	20			x	
ENERTOTAL	15				x (5-8)
ENERCO	9				x (5)
DICELER	3			x	
AIRE	1	X	x	x	
CARIBEMAR	1		x	x	
CELSIA_COLOMBIA	1		x	x	
CELSIA_TOLIMA	1		x	x	
CETSA	1		x	x	
CHEC	1	X			
CODENSA	1	X	x		
ELECTROHUILA	1		x		
EMCALI	1		x	x	
EPM	1		x		

**Tabla 21.** Empresas con tarifas horarias

#### Consideraciones:

- Para el componente de generación CREG 031 de 1997, se tendrá que evaluar cambios en la forma en que se transacciona la energía entre generador y comercializador. A la fecha no se considera franjas horarias en el proceso de contratación, y con una implementación horarias, se tendrá que evaluar los impactos que pudiera tener en las diferencias entre un consumo proyectado y un consumo real. Además, se tendrá que considerar una evaluación de los posibles beneficios de tarifas dinámicas para considerar facilitar esas señales de precio al comercializador.
- Se tendrá que evaluar las diferencias relevantes entre franjas horarias en las metodologías utilizadas para el cálculo de los cargos horarios en el componente de transmisión y distribución dispuestas en la CREG 011 de 2009 y CREG 015 de 2018. Asimismo, se tendrá que evaluar la periodicidad en la que la LAC calcula los cargos.
- Componente de pérdidas y restricciones actualmente referenciadas en CREG 119 de 2007 y 015 de 2018, se tendrá que evaluar si se le agrega un elemento horario.
- Para el esquema de subsidios y contribuciones se tendrá que clarificar como se calculará las contribuciones, si es en forma de bloques horarios o si es en forma de total del mes.

#### B.4. Generación distribuida y balance neto

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables se empezó a promover a partir de la **Ley 1715 de 2014** mediante la cual se permite a los autogeneradores entregar sus excedentes de energía a la red eléctrica. Para la autogeneración a pequeña escala, se determinó que se deben aceptar los medidores bidireccionales de bajo costo, así como que deben existir mecanismos simplificados de conexión y entrega de excedentes.

El límite de potencia máximo para que un autogenerador sea considerado como de pequeña escala, definido en la **Resolución UPME 281 de 2015, es igual a 1 MW**. En la **Resolución CREG 030 de 2018**, se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el SIN.

##### Comercialización de energía

Para explicar cómo funciona el esquema de compensación de balance neto en Colombia, se presenta el siguiente ejemplo:

En Colombia, un autogenerador de pequeña escala con capacidad instalada menor o igual a 0.1 MW produce 500 kWh/mes durante el día con un sistema fotovoltaico y consume 400 kWh/mes, divididos en 50% día y 50% noche. Asumiendo que los paneles solares cubren el total de la demanda diurna y mandan el excedente a la red eléctrica, y en la noche se importa el total de la demanda de la red, se obtienen los siguientes valores:

Variable	Energía
Importación (Noche)	200 kWh
Autoconsumo (Día)	200 kWh
Exportación total	300 kWh
Exportación 1 (Máx = Importación)	200 kWh
Exportación 2 (Exportación total – Exportación 1)	100 kWh

**Tabla 22.** Energía generada, importada, consumida y exportada por un AGPE

El valor del total de créditos de energía sería calculado de la siguiente forma:

$$VE_{<0.1MW} = (Exp1 - Imp) * CUv - (Exp1 * Cv) + Exp2 * PB$$

Donde:

- CUv = Componente Variable del Costo Unitario de Prestación del Servicio (\$/kWh)
- Cv = Margen de Comercialización (\$/kWh)
- PB = Precio de Bolsa horario, siempre y cuando no supere el precio de escasez ponderado.

Bajo este ejemplo, el usuario no paga por su consumo de energía importado de la red, pero paga el margen de comercialización de los 200 kWh de exportación 1. Los 100 kWh de exportación 2, en lugar de pagarse al valor del costo unitario, se pagan al precio de bolsa horario que siempre es menor[18], ya que se determina únicamente con la oferta de los generadores y la demanda de los comercializadores. Esta forma de pago busca prevenir que los autogeneradores instalen sistemas de mayor capacidad a la que requieren para sus necesidades energéticas.

Si el autogenerador tuviese una capacidad instalada mayor a 0.1 MW y menor a 1 MW, el valor se calcularía de la siguiente forma:

$$VE_{>0.1MW} = VE_{<0.1MW} - Exp1 * (T + D + PR + R)$$

:En este caso, el comercializador además de cobrar el costo de comercialización, cobra el servicio del sistema como la suma de las variables de Transmisión (T), Distribución (D), Pérdidas (PR) y Restricciones (R). Esta forma no se considera balance neto, ya que al generador la electricidad exportada solo se le paga el componente de generación y en la importación si se le cobran todos los componentes del costo unitario. Bajo esta forma de pago, se privilegia el autoconsumo y sería más rentable contar con sistemas de almacenamiento que reduzcan la importación y exportación.

[18] El promedio del precio máximo promedio de bolsa para el trimestre 1 de 2021 fue de \$420.31 COP (XM, 2021), mientras que el costo unitario promedio del estrato 4 para el mismo periodo rondó entre \$495.34 y \$713.53 COP (Superservicios, 2021).

## C. Descripción del modelo tecno-económico

A fin de evaluar los impactos económicos de la implementación de tarifas horarias en Colombia, se utilizó la herramienta de cálculo en el programa Microsoft Excel® desarrollada en este proyecto. La herramienta brinda diversas ventajas para la estimación de los beneficios bajo diferentes escenarios de tarifa y de presencia de tecnologías baja de carbono y de redes inteligentes tales paneles solares, baterías y cargadores de vehículo eléctrico.

A continuación, se describen las variables con mayor impacto en el consumo de energía eléctrica consideradas en la herramienta para el establecimiento de escenarios base. Para cada una de las variables se acotaron sus valores a fin de construir los escenarios de mayor relevancia para el análisis. Las variables utilizadas son la ubicación (ciudad), tipo de usuario, consumo energético, tarifa horaria, y perfil energético.

### C.1. Ubicaciones y perfiles energéticos

#### Ubicaciones

La selección de la ciudad tiene un impacto directo en el costo unitario de la energía promedio y en la radiación solar, debido a que las condiciones de clima determinan el perfil de demanda a la que pertenece. Para este estudio, las ciudades analizadas y sus parámetros clave se presentan en la **Tabla 23**. La selección de estas ciudades se basó en su altura, clima y relevancia a nivel nacional.

Ciudad	Mercado	Altura	Clima	Costo unitario, promedio anual 2020
Bogotá	Bogotá - Cundinamarca	Alto	Frío	527.81 COP/kWh
Medellín	Antioquia	Medio	Templado	571.83 COP/kWh
Barranquilla	Caribe Sol	Bajo	Cálido	485.92 COP/kWh

**Tabla 23.** Ciudades de Colombia analizadas

#### Perfiles energéticos

El perfil de demanda y el costo unitario de la electricidad dependen de diversos parámetros. En particular, las variables como el tipo de usuario, estrato, nivel de tensión y nivel de consumo son parámetros relevantes para el análisis económico. En la **Tabla 24**, se muestran los tipos de usuarios y las variables utilizadas para la generación de los escenarios en el análisis económico y financiero.

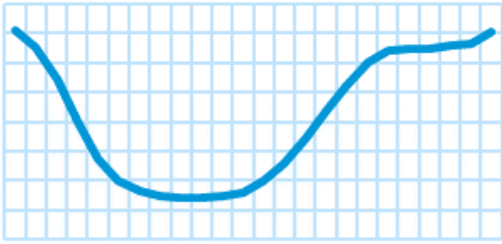
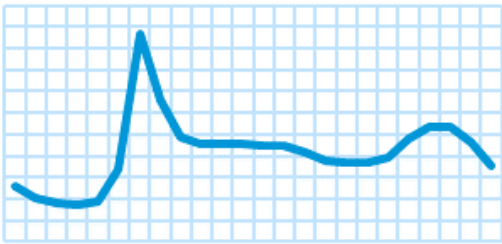
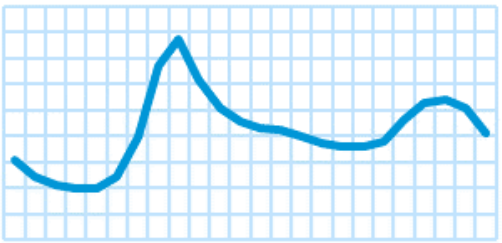
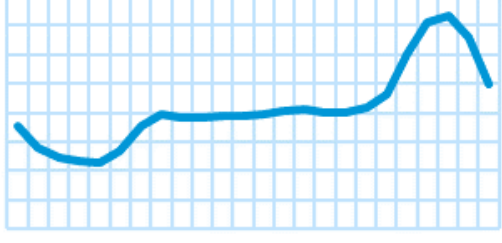
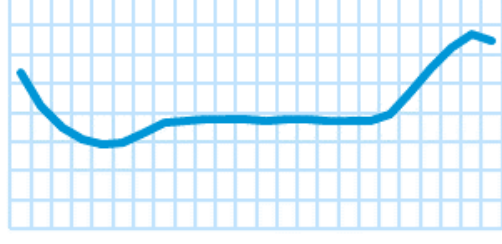
Tipo de usuario	Variables - análisis económico	Consumo energético anual (kWh)
Residencial	Estrato 4	6,000
Comercial	Nivel de Tensión 1	60,000
Industrial	Nivel de Tensión 1	600,000

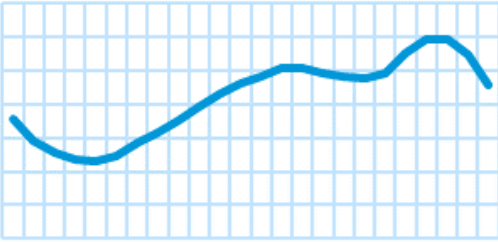
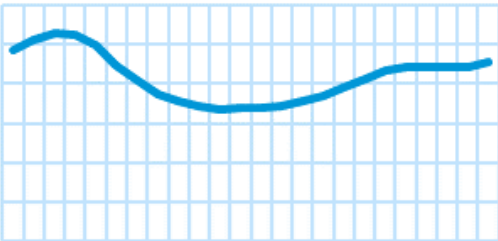
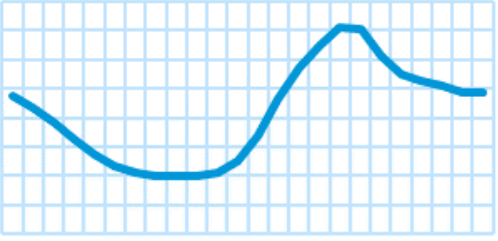
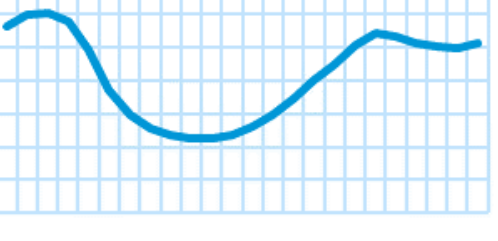
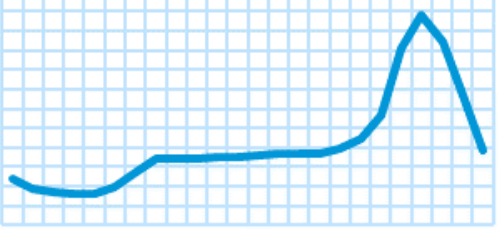
**Tabla 24.** Tipos de usuarios evaluados

Es importante resaltar que, en el caso de los usuarios residenciales, se seleccionó la tarifa correspondiente al Estrato 4. La razón es que se trata de la tarifa que corresponde al precio real de la electricidad, y por lo tanto no estaría afectada por ningún subsidio o impuesto cruzado que distorsione la evaluación económica. Es decir, este estrato podría servir como escenario base para análisis subsecuentes de tarifas en donde se encuentren presentes subsidios cruzados a fin de evaluar su impacto en la adopción de, por ejemplo, sistemas fotovoltaicos.

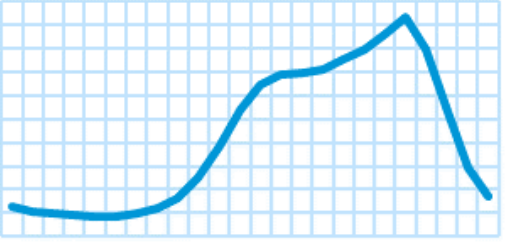
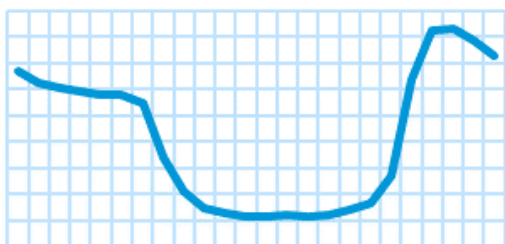
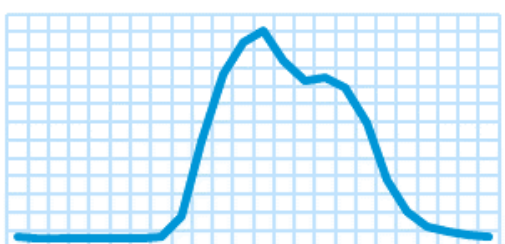
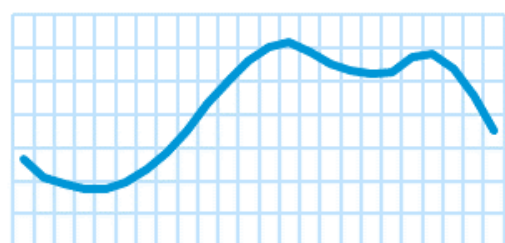
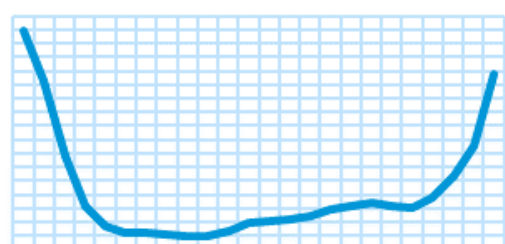


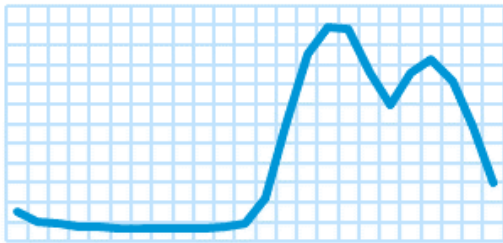
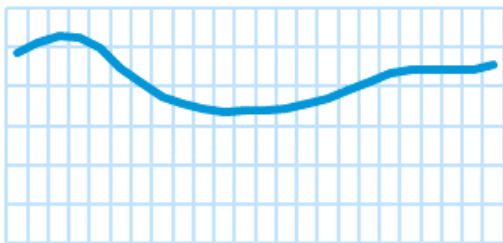
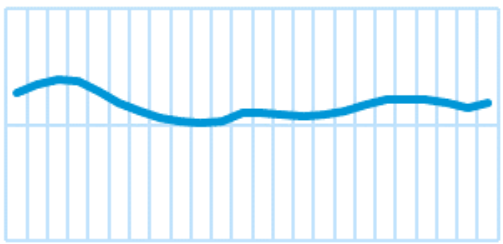
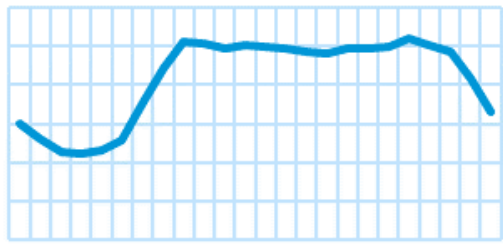
Los perfiles energéticos utilizados para este análisis se extrajeron de los resultados del Output 1 de este proyecto. Fueron elaboradas por la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) a partir de la caracterización y agrupamiento de datos de medidores inteligentes proporcionados por ENEL CODENSA, CELSIA, CEO, EPM y XM. La **Tabla 25** presenta los resultados de las curvas para el sector residencial, y la **Tabla 26** para los sectores comercial e industrial. Debido a que muchos de los datos de medidores inteligentes fueron obtenidos para lugares altos con clima frío, como la ciudad de Bogotá, se realizó una agrupación más específica que derivó en más curvas de demanda. Para el caso del clima cálido y los usuarios industriales, se consideró una curva de demanda por clasificación solamente debido a la poca información disponible.

Altura / Clima ID	Gráfica	Descripción
Alto / Frío R1		Usuarios con bajo consumo en horas del día y pico de demanda en horas de la noche.
Alto / Frío R2		Usuario que presenta su mayor pico de consumo en horas de la mañana y un segundo pico en horas de la noche.
Alto / Frío R3		Usuarios con dos picos de consumo a lo largo del día. El más grande en horas de la mañana y el segundo pico en horas de la noche.
Alto / Frío R4		Usuarios con bajo consumo en horas del día y pico entre 19 y 21 horas.
Alto / Frío R5		Usuarios con bajo consumo en horas del día y pico entre 21 y 23 horas.

Altura / Clima ID	Gráfica	Descripción
<b>Alto / Frío R6</b>		<p>Usuarios con consumo de energía bajo en horas de la madrugada que aumenta progresivamente a lo largo del día hasta alcanzar su consumo pico sobre las 20:00 horas.</p>
<b>Medio / Templado R7</b>		<p>Usuarios con mayor consumo en horas de la madrugada y consumo constante a lo largo del día.</p>
<b>Medio / Templado R8</b>		<p>Usuarios con consumo que incrementa progresivamente a partir del medio día hasta llegar al pico a las 15:00 hrs y con mayor consumo en la madrugada que en la mañana.</p>
<b>Medio / Templado R9</b>		<p>Usuarios con mayor consumo en horas de la noche y madrugada.</p>
<b>Medio / Templado &amp; Bajo / Cálido (húmedo o seco) R10</b>		<p>Usuarios con un pico de demanda entre las 18:00 y las 22:00 hrs y bajo consumo en el resto del día.</p>

**Tabla 25.** Curvas de demanda, sector Residencial

Altura / Clima ID	Gráfica	Descripción
Alto / Frío NR1		<p>Usuarios con consumo tipo campana, siendo bajo en la madrugada y aumentando en las horas del día, con pico a las 19:00 hrs.</p>
Alto / Frío NR2		<p>Usuarios con mayor consumo en horas de la noche y madrugada, presentando su pico a las 20:00 hrs.</p>
Alto / Frío NR3		<p>Usuarios con consumo tipo campana, siendo bajo en la noche y madrugada y aumentando en las horas del día, con pico a las 13:00 hrs.</p>
Alto / Frío NR4		<p>Usuarios con consumo tipo campana con dos picos a lo largo del día, el primero alrededor de las 11:00 y el segundo a las 20:00</p>
Medio / Templado NR5		<p>Usuarios con consumo nocturno, con un incremento a partir de las 21:00 hrs y un decremento a partir de las 00:00 hrs y hasta las 04:00 hrs.</p>

Altura / Clima ID	Gráfica	Descripción
Medio / Templado NR6		Usuarios con consumo tipo campana con dos picos a lo largo del día, el primero alrededor de las 16:00 y el segundo a las 21:00.
Bajo / Cálido (húmedo o seco) NR7		Usuarios con consumo relativamente constante, con un pico de demanda en horas de la madrugada.
Alto / Frío & Medio / Templado NR8		Usuarios industriales que presentan un consumo constante a lo largo de las 24 horas del día con variaciones de consumo en horas específicas y de corta duración.
Bajo / Cálido (húmedo o seco) NR9		Usuarios industriales que presentan un consumo constante a lo largo del día y que en horas de la noche no tienen tanta actividad.

**Tabla 26.** Curvas de demanda, sector Comercial e Industrial

La siguiente tabla muestra los escenarios considerados para cada altura/clima por tipo de usuario. Para cada uno de ellos se evaluaron distintas curvas de demanda. En total se identificaron 11 escenarios relevantes para el sector residencial, 7 para el comercial y 3 para el industrial.

Altura / Clima	Tipo de usuario		
	Residencial	Comercial	Industrial
Alto – Frío	R1 – R6	NR1 – NR4	NR8
Medio – Templado	R7 – R10	NR5 – NR6	NR8
Bajo – Cálido	R10	NR7	NR9
<b>Total</b>	<b>10 curvas, 11 escenarios</b>	<b>7 curvas de demanda 7 escenarios</b>	<b>2 curvas de demanda 3 escenarios</b>

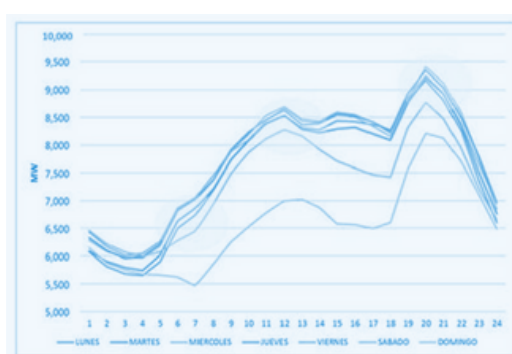
**Tabla 27.** Identificador de curvas de demanda por tipo de usuario y clima

## C.2. Diseño de las tarifas horarias

Con base en la curva de demanda promedio en Colombia (ver **Figura 39**), se determinaron los periodos de tiempo de cada tarifa a ser evaluada (ver **Tabla 28**). Es decir, para la estimación de los beneficios económicos, las horas que se cobran con tarifa punta corresponden a los periodos de mayor consumo del sistema eléctrico nacional.

Tipo de Tarifa	Periodos de tiempo		
	Doble Tipo 1	Doble Tipo 2	Triple
Base	00:00 – 09:59 22:00 – 23:59	00:00 – 09:59 14:00 – 17:59 22:00 – 23:59	00:00 – 05:59 22:00 – 23:59
Intermedio	-	-	06:00 – 17:59
Punta	10:00 – 21:59	10:00 – 13:59 18:00 – 21:59	18:00 – 21:59

**Tabla 28.** Periodos de las tres tarifas horarias a evaluar



**Figura 39.** Curva de demanda promedio de Colombia (Fuente: XM)

Para determinar el costo de las tarifas base y punta se realizó un ajuste de +/- 25% sobre el costo unitario, que también se tomó como el costo de la tarifa intermedia. A pesar de los diferenciales de precio en tarifa horaria son mínimos en Colombia, se utilizó este valor de 25% para ver el efecto de la tarifa en los posibles beneficios económicos de los usuarios finales si el diferencial de precio fuese similar al de otros países con tarifas horarias, como se ilustra en el Anexo B. Esto puede hacer que en realidad los precios no reflejen el costo del mercado, más bien el precio en periodo base sería más barato que el costo marginal en ese periodo base y el precio de punta sería más caro que el costo marginal en periodo punta, generando una distorsión horaria diferenciada tanto del escenario actual con la tarifa monomía como del costo óptimo.

Los costos por ciudad utilizados para el cálculo de beneficios económicos se muestran en la **Tabla 29**. Para los usuarios que pagan contribución, a estos precios se les agrega un 20% adicional.

Ciudad / Tarifa	Base (CU*0.75)	Intermedio (CU)	Punta (CU*1.25)
Bogotá	395.86	527.81	659.76
Medellín	428.87	571.83	714.79
Barranquilla	364.44	485.92	607.40

**Tabla 29.** Costos tarifarios horarios sin subsidio ni contribución por ciudad (COP/kWh)

## C.3. Tecnologías baja de carbono y de redes inteligentes

A fin de evaluar el impacto de la implementación de paneles solares y baterías, se definieron las variables técnicas que serán constantes a lo largo de la simulación por tipo de usuario. Es importante resaltar que los sistemas no están optimizados, ya que se buscó una evaluación imparcial y equitativa la compra de cierto número de paneles y de cierta capacidad y potencia de una batería.

### Paneles solares

Para este caso, se calcularon los beneficios económicos asociados a todos los escenarios que se utilizaron en la evaluación del cambio de tarifa monomía a tarifa horaria con la demanda base.

Parámetro / Tipo de Usuario	Residencial	Comercial	Industrial
Consumo energético anual (kWh)	6,000	60,000	600,000
Potencia del sistema (kW)	2.4 kW (6 x 400)	20 kW (50 x 400)	100 kW (250 x 400)

**Tabla 30.** Consumo y capacidad instalada por tipo de usuario

### Baterías

A diferencia del escenario de paneles solares y debido a limitaciones técnicas, únicamente se evaluarán 3 escenarios con sistemas de almacenamiento de energía, con base en la relevancia observada después del análisis de los escenarios con generación solar, seleccionando uno por ciudad.

Parámetro / Tipo de Usuario	Residencial	Comercial	Industrial
Consumo energético anual (kWh)	6,000	60,000	600,000
Energía total (kWh)	8	60	350
Potencia máxima (kW)	2	8	70
Estado de carga mínimo	20%	20%	20%
Eficiencia de ida y vuelta	<b>98%</b>	<b>98%</b>	<b>98%</b>

**Tabla 31.** Parámetros técnicos para baterías por tipo de usuario

### Vehículos eléctricos

En contraste con las tecnologías anteriores, para el estudio de vehículos eléctricos no se consideraron las curvas de demanda mencionadas anteriormente; únicamente se construyeron las curvas con la demanda de los vehículos. Además, se analizaron tres en lugar de dos escenarios: tarifa monomía, tarifa horaria con carga estándar y tarifa horaria con carga inteligente. Para la comparación entre escenarios, al sector residencial se le asignó un auto, al sector comercial tres autos y al sector industrial cinco autos con baterías de diferentes capacidades. También se consideraron diferentes tipos de cargadores, de los cuales ya se tiene registro que han sido aplicados al menos en la ciudad de Bogotá.

	Auto 1	Auto 2	Auto 3	Auto 4	Auto 5
Número de carros por tipo	1	1	1	1	1
Capacidad utilizable de la batería	30 kWh	55 kWh	55 kWh	86 kWh	86 kWh
Capacidad del centro de carga	7 kW	10 kW	43 kW	10 kW	50 kW
Eficiencia	5 km/kWh	5 km/kWh	5 km/kWh	5 km/kWh	5 km/kWh

**Tabla 32.** Características técnicas de los vehículos eléctricos a analizar



En el caso de los vehículos eléctricos, se determinaron los parámetros de comportamiento de carga de acuerdo con un estudio realizado por Element Energy acerca del comportamiento de carga de los vehículos eléctricos en el Reino Unido (Element Energy, 2019).

- Los cargadores de usuarios residenciales en un día promedio tienen un pico de potencia entre las 7 y 8 pm. Por lo tanto, se definió que el vehículo eléctrico se conecta una sola vez a la red a partir de las 7 pm.
- Los cargadores ubicados con usuarios comerciales, los cuales son considerados como puntos de carga públicos ya que se ubican en centros comerciales u otros, tienen su pico de demanda en la mañana entre 9 y 10 am. También hay picos secundarios, los cuales coinciden con la hora de comida entre 1 y 2 pm y a las 6 y 7 pm cuando las personas pueden estar conectando su vehículo para que cargue durante la noche.
- Para los cargadores ubicados con usuarios industriales, estos los estamos considerando como el equivalente a lugares de trabajo en este estudio. En la publicación previamente mencionada, la forma de la curva de demanda muestra un pico máximo entre 8 y 9 am, lo cual coincide con la llegada de los empleados a su trabajo. Sin embargo, también hay un pico entre 1 y 2 pm, lo cual sugiere que otros vehículos pueden conectarse ya que se han liberado espacios en el punto de carga.

Con todos estos datos en consideración, en la **Tabla 33** se especifican los tiempos y las distancias que recorren los vehículos eléctricos. Se asume que se conecta el vehículo a la hora de regreso y la suma de las distancias siempre es igual a 30 km, lo cual es el promedio de recorrido diario en la ciudad de Bogotá.

	Auto 1	Auto 2	Auto 3	Auto 4	Auto 5
Hora de salida 1	08:00	08:00	10:00	07:00	08:00
Hora de regreso 1	19:00	09:00	11:00	08:00	09:00
Distancia del viaje 1	30 km	20 km	15 km	15 km	20 km
Hora de salida 2	N/A	12:00	17:00	17:00	12:00
Hora de regreso 2	N/A	13:00	18:00	18:00	13:00
Distancia del viaje 2	N/A	10 km	15 km	15 km	10 km

**Tabla 33.** Comportamiento del usuario para el manejo de los vehículos

#### C.4. Parámetros financieros

Para realizar la evaluación de factibilidad de las tecnologías de paneles solares y baterías, se utilizaron los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor	Justificación
<b>Inflación</b>	6%	Colombia cerró 2021 con una inflación de 5.62% (La República, 2022). Para el modelo se redondeó al número entero más próximo.
<b>Tipo de cambio</b>	3,800 COP / USD	Colombia cerró 2021 con un tipo de cambio de 4,065 COP / USD. Aunque el promedio del año 2021 fue alrededor de 3,750 COP/USD, se tomó un valor superior ligeramente superior al promedio por criterio conservador, previendo fluctuaciones al alza en el mercado cambiario.
<b>Máximo tiempo de retorno de inversión</b>	7 años	Se determinó de forma arbitraria. Mientras que en países con alta radiación solar, se espera un retorno en máximo 5 años, en países con poca radiación solar 15 años es un buen periodo para recuperar la inversión.
<b>Tasa de descuento</b>	9%	De acuerdo con el recálculo realizado por el Departamento Nacional de Planeación de Colombia, la tasa social de descuento pasó de 12% a 9%. (Piraquive, Matamoros, Cespedes, & Rodríguez, 2018).
<b>Paneles solares</b>		
<b>Costo unitario por capacidad instalada</b>	1,500 USD / kW	Este valor incluye el costo del equipo, costo de instalación e interconexión a la red, impuestos. Para determinar este valor se tomó como referencia los datos de costos de paneles solares recopilados por BEIS para instalaciones de Reino Unido. Se utilizó el valor promedio del periodo 2020-21 para instalaciones de 0-4 kW de capacidad instalada, convertido a USD. (BEIS, 2021). Se ajustó el valor de 2000 USD / kW con un factor de 0.75 para adecuar los costos a la región.
<b>O&amp;M como % del CAPEX</b>	1%	Se determinó de forma arbitraria, con base en la experiencia del autor.
<b>Baterías</b>		
<b>Número de ciclos de carga y descarga</b>	3,000	Este valor se utiliza para calcular el tiempo de vida del equipo. Se multiplica la capacidad de la batería por el número de ciclos y se divide entre la descarga promedio anual. Para este caso, se calculan 10 años de vida tanto para la batería como para el inversor.
<b>Costo de la batería</b>	350 USD / kWh	Precios adaptados de (NREL, 2022). El precio de NREL únicamente considera el precio del equipo. El incremento con respecto a esos precios se aplicó para incluir los costos de instalación, interconexión entre otros.
<b>Costo del inversor de la batería</b>	600 USD / kW	
<b>O&amp;M como % del CAPEX</b>	1%	Se determinó de forma arbitraria, con base en la experiencia del autor.

**Tabla 34.** Parámetros financieros

# Referencias

- BEIS. (27 de Mayo de 2021). Solar photovoltaic (PV) cost data. Obtenido de <https://www.gov.uk/government/statistics/solar-pv-cost-data>
- Element Energy. (29 de Marzo de 2019). Electric Vehicle Charging Behaviour Study. Obtenido de Final Report for National Grid ESO: <http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2019/04/20190329-NG-EV-CHARGING-BEHAVIOUR-STUDY-FINAL-REPORT-V1-EXTERNAL.pdf>
- Energía Estratégica. (17 de Noviembre de 2020). Las regulaciones que estudia la CREG para aplicar el uso de renovables con baterías. Obtenido de Energía Estratégica: <https://www.energiaestrategica.com/las-regulaciones-que-estudia-la-creg-para-aplicar-el-uso-de-renovables-con-baterias/>
- Energía Estratégica. (20 de Junio de 2021). Nueva ley trae incentivos fiscales para renovables, hidrógeno y almacenamiento en Colombia. Obtenido de Energía Estratégica: <https://www.energiaestrategica.com/nueva-ley-trae-nuevos-incentivos-fiscales-para-renovables-hidrogeno-y-almacenamiento-en-colombia/>
- Global Change Data Lab. (2020). Solar PV Module Prices. Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices?time=2007..latest>
- Gómez-Ramírez, J., Murcia-Murcia, J., & Cabeza-Rojas, I. (2017). La energía solar fotovoltaica en Colombia: Potenciales, antecedentes y perspectivas. Universidad Santo Tomás, 19.
- IDEAM. (2021). Variación Espacio Temporal. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variacion-espacio-temporal1>
- IDEAM. (s.f.). Atlas interactivo - Radiación IDEAM. Obtenido de IDEAM: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IRENA. (2017). Electricity Storage and Renewables: Costs and markets to 2030. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2019). Innovation landscape brief: Aggregators. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020). Innovation Landscape Brief: Pay-as-you-go models. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020). Innovation landscape brief: Energy as a Service. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency

# Referencias

- La República. (5 de Enero de 2022). Colombia cierra 2021 con inflación de 5,62%, la más alta registrada en cinco años. Obtenido de La República: <https://www.larepublica.co/economia/colombia-cierra-2021-con-inflacion-de-562-la-mas-alta-registrada-en-cinco-anos-3283454>
- McRae, S., & Wolak, F. (April de 2020). Retail pricing in Colombia to support the efficient deployment of distributed generation and electric vehicles. Working Paper, 1 - 68.
- NREL. (2022). Residential Battery Storage | Electricity | 2021. Obtenido de Annual Technology Baseline | NREL: [https://atb.nrel.gov/electricity/2021/residential\\_battery\\_storage](https://atb.nrel.gov/electricity/2021/residential_battery_storage)
- Piraquive, G., Matamoros, M., Cespedes, E., & Rodríguez, J. (8 de Agosto de 2018). Actualización de la tasa de rendimiento del capital en Colombia bajo la metodología de Harberger. Obtenido de Departamento Nacional de Planeación: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/487.pdf>
- Red Jurista. (1 de Junio de 2021). Publican la Resolución 056 de 2021 emitida por la CREG. Obtenido de Red Jurista: <https://www.redjurista.com/NewsPaper/39/servicios-publicos/17425/publican-la-resolucion-056-de-2021-emitida-por-la-creg>
- Restrepo, A., Nope, S., & Enriquez, D. (2018). Beneficios Económicos de la Gestión de la Demanda y la Energía Autogenerada en el Contexto de la Regulación Colombiana. Información tecnológica, 29(1). doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100105>
- Statista Research Department. (2 de Julio de 2021). Número de vehículos eléctricos e híbridos vendidos en Colombia desde 2011 a 2020. Obtenido de Statista: <https://es.statista.com/estadisticas/1134824/volumen-ventas-vehiculos-electricos-hibridos-colombia/>
- SUI. (Junio de 2021). Reportes SUI - Energía. Obtenido de Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios: [http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele\\_com\\_095](http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_095)
- Suncolombia. (2021). Paneles solares. Obtenido de Tienda - Suncolombia: <https://www.suncolombia.com/product-category/paneles-solares/>
- UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Bogotá: UPME.
- UPME. (31 de Julio de 2018). Plan de expansión de referencia Generación - Transmisión 2017 - 2031. Bogotá: UPME.
- UPME, C. U. (2020). Apoyo al despliegue de tecnologías de redes inteligentes en Colombia. Reporte final. UPME, Carbon Trust, Universidad Nacional de Colombia, Imperial College London.



**carbontrust.com**

**+44 (0) 20 7170 7000**

Whilst reasonable steps have been taken to ensure that the information contained within this publication is correct, the authors, the Carbon Trust, its agents, contractors and sub-contractors give no warranty and make no representation as to its accuracy and accept no liability for any errors or omissions. Any trademarks, service marks or logos used in this publication, and copyright in it, are the property of the Carbon Trust. Nothing in this publication shall be construed as granting any licence or right to use or reproduce any of the trademarks, service marks, logos, copyright or any proprietary information in any way without the Carbon Trust's prior written permission. The Carbon Trust enforces infringements of its intellectual property rights to the full extent permitted by law.

The Carbon Trust is a company limited by guarantee and registered in England and Wales under Company number 4190230 with its Registered Office at: 4th Floor, Dorset House, 27-45 Stamford Street, London SE1 9NT.

© The Carbon Trust 2022. All rights reserved.

Published in the UK: 2022