



**PANORAMA ACTUAL DE LA GENERACIÓN HIDRÁULICA EN COLOMBIA Y
ANTIOQUIA ANTE EL CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA**

Maria Alejandra Tamayo Rincón

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Eficiencia Energética

Asesora

Laura Isabel Velásquez García, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Eficiencia Energética
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	(Tamayo Rincón, 2022)
Referencia	Tamayo Rincón, M. A. (2022). <i>Panorama actual de la generación hidráulica en Colombia y Antioquia ante el crecimiento de la demanda de energía</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Eficiencia Energética, Cohorte I.

Grupo de Investigación Energía Alternativa.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Pedro León Simanca

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

1. Resumen.....	6
2. Abstract.....	7
3. Introducción.....	8
4. Objetivos.....	15
4.1 Objetivo general.....	15
4.2 Objetivos específicos.....	15
5. Desarrollo del Estado del Arte.....	16
5.1. Energía eléctrica.....	16
5.1.1. Cómo se genera la energía eléctrica.....	16
5.1.2. Centrales en régimen especial.....	17
5.1.3. Usos de la energía eléctrica.....	18
5.1.4. Usos por sector.....	18
5.2. Energía renovable y no renovable.....	20
5.2.1. Usos de las energías renovables y no renovables: Contexto internacional.....	22
5.2.2. Usos de las energías renovables y no renovables: Contexto nacional.....	26
5.3. La energía en Colombia.....	28
5.3.1. Tecnologías para fuentes convencionales.....	29
5.3.2. Tecnologías para fuentes no convencionales.....	30
5.3.3. Generación eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional.....	31
5.4. Funcionamiento de una central hidroeléctrica.....	35
5.4.1. Clasificación según su potencia.....	38
5.4.2. Clasificación según el salto.....	38
5.4.3. Clasificación según la regulación de caudal.....	39
5.5. Pequeñas centrales hidroeléctricas.....	42
5.5.1. Potencia hidroeléctrica instalada (Internacional).....	43
5.5.2. Potencia hidroeléctrica instalada (Nacional).....	46
5.5.3. Potencia instalada (Antioquia).....	51
5.6. Tipos de turbina utilizados en las centrales hidroeléctricas Colombianas.....	55
6. Discusión.....	64
7. Conclusiones.....	66
8. Referencias.....	68

Lista de Tablas

Tabla 1. Potencia de las centrales en régimen especial (López, 2002)	17
Tabla 2. Clasificación de centrales hidroeléctricas en Colombia según su potencia	38
Tabla 3. Clasificación de centrales hidroeléctricas según el salto.	38
Tabla 4. Capacidad instalada hidráulica en Regiones de Colombia	48
Tabla 5. Principales proyectos de PCHs en Antioquia 2022.....	53
Tabla 6. Proyectos de PCHs más importantes vigentes en desarrollo de Antioquia para el 2022 .	54
Tabla 7. Total de potencial energético de centrales hidroeléctricas por municipio en Antioquia .	54
Tabla 8. Tipos de turbinas utilizadas en PCHs colombianas	62
Tabla 9. Proyecciones de expansión de PCHs en Colombia.....	63

Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de energías.	20
Figura 2. Distribución energética a nivel mundial	23
Figura 3. Distribución y consumo energético mundial	24
Figura 4. Consumo de energéticos por regiones a nivel mundial.....	26
Figura 5. Histórico de distribución de producción de energía primaria por energético en Colombia.....	27
Figura 6. Capacidad efectiva por tipo de generación para Colombia en el año 2022	28
Figura 7. Generación eléctrica del Sistema Interconectado Nacional	32
Figura 8. Distribución del parque de generación eléctrica colombiano	33
Figura 9. Participación según tecnología en la matriz energética colombiana para el año 2019	33
Figura 10. Proyectos aprobados a 2022 por la UPME para generación de energía eléctrica en Colombia.	34
Figura 11. Central Hidroeléctrica	36
Figura 12. Central Hidroeléctrica a filo de agua (partes)	40
Figura 13. Central hidroeléctrica a filo de agua Fuente: CELSIA	40
Figura 14. Central Hidroeléctrica con embalse de regulación.....	41
Figura 15. Generación mundial de hidroelectricidad de 1971 a 2017	44
Figura 16. Porcentaje y capacidad de generación de hidroelectricidad a nivel mundial 1973 vs 2017	45
Figura 17. Total mundial de la capacidad hidroeléctrica instalada [GW] por país en 2014.....	45
Figura 18. Capacidad instalada de proyectos PCH en Colombia (2022)	48
Figura 19. Suma de capacidad de proyectos hidráulicos vigentes en Colombia 2022 - Clasificación por regulación de caudal.....	49
Figura 20. Capacidad Unidades hidráulicas del Sistema Interconectado Nacional.....	50
Figura 21. Capacidad instalada para generación eléctrica en Antioquia PCHs 2019.....	52
Figura 22. Principales proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas en Antioquia vigentes al año 2022	53
Figura 23. Zonificación por el IDEAM para sitios de proyectos identificados para PCH en Antioquia	54
Figura 24. Tabla de selección para diferentes tipos de turbina	57
Figura 25. Tabla de selección de turbinas hidráulicas.....	58
Figura 26. Turbina Pelton.....	59
Figura 27. Turbina Turgo	59
Figura 28. Turbina Michell-Banki.....	60
Figura 29. Turbina Kaplan	61
Figura 30. Turbina Francis	62
Figura 31. Tipos de turbinas y cantidad instaladas en PCH de Colombia.....	63

1. Resumen

El gobierno de Colombia ha puesto su mirada en una política energética que esté en el centro de la recuperación económica y social, por ello, su propuesta está dirigida principalmente hacia fuentes de generación de energía más limpia y al aprovechamiento de los recursos de la nación con menores daños para impulsar el desarrollo sostenible. Este trabajo busca mostrar de forma general un panorama actual de la generación hidráulica en Antioquia y Colombia ante el crecimiento de la demanda de energía. Conociendo la gran importancia y la cantidad de aplicaciones de la electricidad y la relación que existe con el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del agua (tanto en saltos como en corrientes), es de interés para Colombia que teniendo los recursos hídricos para el desarrollo de proyectos de generación de energía, las diferentes tecnologías empleadas para la producción de recursos energéticos sean a partir de energía hídrica y represente el 68% de la oferta energética del país. En consecuencia, este trabajo presenta un estado del arte de los proyectos con energía hídrica y aspectos importantes de ellos a nivel nacional y del departamento de Antioquia. Los pequeños y medianos proyectos con tecnologías para el uso de energía hídrica aunque son aportes a la generación y quieren apoyar a la disminución de los GEI en el país, presentan tanto retos como soluciones, que abren puertas a la posibilidad de que en Colombia los recursos sean aprovechados de una forma eficiente construyendo una matriz energética mejor y más amplia.

Palabras clave: eficiencia energética, energía, centrales hidroeléctricas, pequeñas central hidroeléctrica (PCH)

2. Abstract

The Colombian government has set its sights on an energy policy that is at the center of economic and social recovery; therefore, its proposal is mainly directed towards cleaner energy generation sources and the use of the nation's resources with less damage to promote sustainable development. This work seeks to show a general overview of the current panorama of hydroelectric generation in Antioquia and Colombia in the face of energy demand growth. Knowing a great importance and the number of applications of electricity and the relationship that exists with the use of kinetic and potential energy of water (both in waterfalls and streams), it is of interest for Colombia that having water resources for the development of energy generation projects, the different technologies used for the production of energy resources are based on water energy and represent 68% of the country's energy supply. Consequently, this work presents a state of the art of water energy projects and important aspects of them at the national level and in the department of Antioquia. The small and medium projects with technologies for the use of hydropower, although they are contributions to the generation and they want to support the reduction of greenhouse gases in the country, present both challenges and solutions, which open doors to the possibility that in Colombia the resources are used efficiently, building a better and wider energy matrix.

Keywords: energy efficiency, energy, hydroelectric power plants, small hydropower plant (SHP)

3. Introducción

En los últimos años, el medioambiente y la energía se han vuelto muy populares, éstos, están ligados entre sí. La energía como pilar del desarrollo de los procesos productivos, del progreso social y los avances tecnológicos está en el foco a nivel mundial, y de la mano trae consigo retos en el sector ambiental.

Desde los países tercermundistas hasta las potencias mundiales más poderosas, están reuniéndose para definir acuerdos que involucren el cuidado de los recursos y la recuperación de estos, en especial donde los países de mayor industrialización y los que más contaminan sean a quienes con mayor fuerza les pesen estos decretos. El objetivo principal entonces, de estos acuerdos internacionales, es luchar contra el calentamiento global y el cambio climático. Para poder lograr lo anterior, se necesita reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); aquí es donde aparecen cada vez más y con mayor fuerza las fuentes renovables de energía debido a que son la mejor opción, porque son una alternativa potencial para sustituir los combustibles fósiles y con ello la reducción de las emisiones de GEI.

El gobierno de Colombia ha puesto su mirada en una política energética que esté en el centro de la recuperación económica y social. Por ello, su propuesta está dirigida principalmente hacia fuentes de generación de energía más limpia y al aprovechamiento de los recursos de la nación con menores daños para impulsar el desarrollo sostenible (WTW, 2020).

Según el más reciente estudio nacional del agua, hecho por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la oferta hídrica del país es seis veces superior a la oferta mundial y tres veces mayor que la de Latinoamérica. Lo anterior se traduce en que Colombia es uno de los países del mundo con mayor cantidad de ecosistemas que producen agua, sin incluir los mares (Castillo, 2015). Por años las hidroeléctricas han sido consideradas como sinónimo de desarrollo. Colombia, entonces, gracias a su topografía, pluviosidad y recurso hídrico cuenta con un potencial excepcionalmente alto para desarrollar este tipo de macroproyectos de ingeniería. La riqueza hídrica del territorio colombiano obedece a la ubicación geográfica y la influencia de factores como la circulación atmosférica, la topografía, la interacción entre la tierra y el mar y la influencia de las zonas selváticas. Por su ubicación geográfica, Colombia está bajo la influencia de los vientos alisios del noreste y del sureste, que

concurrer en una franja denominada “zona de confluencia intertropical”, que favorece la formación de nubosidad. (UPME, 2020)

En este orden de ideas, conociendo la gran importancia y la cantidad de aplicaciones de la electricidad y la relación que existe con el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del agua (tanto en saltos como en corrientes), es de interés para Colombia, que teniendo los recursos hídricos para el desarrollo de proyectos de generación de energía, las diferentes tecnologías empleadas para la producción de recursos energéticos, sea a partir de energía hídrica y represente el 68% de la oferta energética del país.

Es entendible que haya razones suficientes para que este tipo de obras sean consideradas como una opción atractiva para la generación de energía: primero, su operación es más económica que las termoeléctricas, segundo, su construcción es menos costosa comparada con otras plantas de generación y tercero pueden proveer energía a gran escala generando bajas emisiones de gases contaminantes que contribuyen al efecto invernadero. Considerando lo anterior, se entiende ahora el por qué la construcción de centrales hidroeléctricas, minicentrales y pequeñas centrales hidroeléctricas en varias regiones del país, sobre importantes afluentes: centrales hidroeléctricas como Guavio, Urrá, Salvajina, Chivor, Calima, Alto Chicamocha, Hidromiel, Hidro-Sogamoso, Peñol-Guatapé, Ituango, San Carlos, Betania, el Quimbo, entre otras, todas ellas suman 33 en el país.

Las plantas que utilizan represas aportaron el 82,9% de la energía renovable total para el mes de febrero de este año, mientras que las centrales de pasada representaron el 15,0%, biomasa 1,5%, solar 0,5% y la eólica 0,1%. (bnamericas, 2021).

De acuerdo con cifras de la firma XM, operador del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia, la oferta de las compañías hidroeléctricas es de 11.834,57 MW.

A pesar de todas las ventajas y desventajas que traen consigo proyectos con energía hídrica, hay aspectos importantes que también a nivel nacional se deberían considerar con mayor detenimiento, y son los vacíos en cuanto a la socialización; dado este escenario, se presentan retos para el país de grandes magnitudes no solo a nivel ambiental, energético y económico. Sin duda alguna, solo unos pocos realizan ejercicios para involucrar a las comunidades y al país de forma detallada y profunda, para entender el impacto de los proyectos no solo en el sector económico y ambiental sino también social y cultural; ¿cómo no va a ser mejor que se resuelvan sin mayores

contrariedades las iniciativas hidroeléctricas que se desarrollan en el territorio nacional?, los conflictos socioambientales siempre van a existir y la gobernanza ambiental en los territorios por el recurso hídrico, pero se alivianan cuando se considera este componente social como aspecto clave, y los permisos para la construcción y operación de los proyectos se otorgarían con mayor facilidad y rapidez.

Proyectos como La Miel I, donde Isagen compró más de 460 hectáreas para desarrollar programas de restauración ecológica de los ecosistemas acuáticos y terrestres, son acciones que no son divulgadas de manera masiva o no involucran lo suficiente a las comunidades y al resto del país con la misma magnitud con la que muestran las obras de infraestructura para estas centrales. Con la adecuada y suficiente socialización que involucre a la sociedad colombiana, profundizando en el conocimiento de los retos y soluciones, sería una forma más contundente no solo de resarcir así sus acciones en cuanto al impacto ambiental, sino que además daría muestra que está haciendo un compromiso con la implementación de un plan de orientación psico-social a las comunidades vulneradas.

Desde los años 2012 y 2013 se visualizaba un panorama donde la energía hídrica tendría gran protagonismo en el país para las siguientes épocas. Para estos años, la energía aportada al SIN fue de 44.923,6 y 41.835,9 GWh respectivamente, lo que representa un 74,9 y 67,3% de la generación total de cada año. El 64% de capacidad efectiva neta instalada con la que contaba el SIN al finalizar 2012 y 2013 fue correspondiente a la energía hidráulica: 9.185 y 9.315 MW respectivamente; y se destacaba un aumento significativo gracias a la entrada en operación de las centrales hidroeléctricas Amoyá la Esperanza de 80 MW y Darío Valencia Samper unidad 2 con 50 MW (Castillo, 2015). Ahora bien, teniendo en cuenta que desde incluso antes del 2012 ya se venían proyectos de grandes magnitudes no solo en capacidad instalada sino en la infraestructura, los posibles proyectos de expansión de generación registrados para los periodos 2014-2022 y en adelante, deberían tener no solo interés por la ampliación de la generación para el país, sino un mayor impacto y ganancia en aquellos aspectos que se consideran hasta el día de hoy los menos importantes.

Un ejemplo claro es Hidroituango, el proyecto energético más grande de Colombia del cual se ha “hablado mucho” pero que en realidad solo unos cuantos tienen interés real en profundizar en las verdaderas fallas y encontrar soluciones que mitiguen los impactos y den cara a las necesidades que van desde el aspecto social hasta fallas tan graves como poner un 25% menos tornillos o pernos

de roca en una sección del túnel (DW, 2020). Se concluyó que la emergencia en la hidroeléctrica en construcción de Ituango, en el noroeste de Colombia, se presentó por una "conjugación de errores" en el diseño y construcción del proyecto... ¿Seguro solo fueron fallos en la ingeniería?, desde que comenzó su construcción en 2009, la mega obra a cargo de EPM ha sido objeto de protestas por parte de los habitantes, asesinatos a líderes de las comunidades que por su participación en la no aprobación del proyecto y la información a los habitantes de estas zonas sobre los impactos económico-ambientales, fueron callados días después de expresar su inconformidad, entonces, no solo son fallos en los diseños, supervisión y construcción que provocaron la emergencia o el colapso del túnel de desviación, son otros aspectos igualmente delicados que claramente ponen en duda que la implementación de tecnologías limpias en el país y más de tales magnitudes como la construcción de una central hidroeléctrica suponen un reto para Colombia y los gobiernos que quieran implementarlas dentro de la matriz energética.

Y así como Hidroituango, hay muchos otros pequeños y medianos proyectos con tecnologías para el uso de energía hídrica que aunque son aportes a la generación y quieren apoyar a la disminución de los GEI en el país, presentan tanto retos como soluciones, que abren puertas a la posibilidad de que en Colombia los recursos sean aprovechados de una forma eficiente pero también con la conciencia de que las poblaciones quienes recibirían los beneficios van muy de la mano con la construcción una matriz energética mejor y más amplia, ayudadas por otras tecnologías limpias como la eólica y la solar que son también dos de las energías renovables que el país puede aprovechar por su ubicación territorial.

Cabe agregar que, aunque las leyes avalan la producción de energía a partir de hidroeléctricas y la construcción de plantas para su tratamiento en Colombia, el verdadero problema radica en las prácticas para la generación de energía y los estudios de los mismos. El cambio climático, la disponibilidad del agua, la diversidad biológica, los servicios ecosistémicos, el riesgo geotécnico, la calidad de vida, la diversificación de la actividad productiva y la gestión pública municipal, son solo algunos de los aspectos que deben pensarse con mayor detenimiento y detalle a la hora de proponer proyectos de energía hídrica en el país.

De lo anterior podemos agregar que, en aspectos ambientales aunque las empresas tratan de mitigar los impactos negativos de este tipo de construcciones, ya sean pequeñas centrales, hay situaciones que a corto o mediano plazo, se van a ver necesitados de nuevas regulaciones y un proceder diferente de los dirigentes nacionales e ingenieros a cargo, ya que al usar los ríos se altera

el hábitat de los peces de agua dulce que habitan los afluentes, dado que las presas obstruyen su movimiento natural y dificultan el flujo de nutrientes provenientes de los sedimentos a los ríos y planicies de inundación represados por los muros de contención destruyendo los acuíferos encargados de equilibrar el ecosistema, además de nutrir de agua los hábitats húmedos como lagos y suelos y abastecer a las comunidades (Vargas, 2018); sabiendo esto, el aspecto relacionado con los habitantes aledaños también debe estar asociado y ligado fuertemente en cada uno de los proyectos.

Finalmente, aunque hay retos grandes también hay beneficios de esta tecnología nacional, la hidroelectricidad en Colombia le ha permitido contar con un servicio energético fiable, el cual es fundamental para proveer seguridad y estabilidad a los sistemas eléctricos y le permite al país mayor autonomía energética al proveerse de manera local, además de que el sistema tenga la capacidad de almacenar energía dándonos la posibilidad de abastecer energía en las temporadas secas y la flexibilidad necesaria para proveer servicios auxiliares requeridos para la operación del sistema eléctrico, como la regulación de frecuencia, al poder responder a cambios rápidos del sistema (Malagón, 2017).

En el presente Colombia tiene una red de interconexión bastante amplia y fuerte, y la capacidad adicional que se integre a esa red es la que tiene que ir a la mayor parte del país, pero ante la amenaza que constituye principalmente el errático comportamiento del clima en el planeta, hoy es obligatorio pensar en el emprendimiento de proyectos que involucren por lo menos los poderes eólico y solar. Para cualquier país, lo ideal es que exista una combinación de distintas fuentes energéticas que aproveche los diferentes usos y tenga la suficiente flexibilidad como para evitar que se paralicen las actividades económicas por cuenta de las crisis que eventualmente se presenten en alguno de los proveedores de ese recurso. Hoy resultarían inadmisibles decisiones como las que condujeron al drástico racionamiento eléctrico que vivió el país en la última década del siglo pasado, principalmente por cuenta de la disponibilidad exclusiva de la hidroelectricidad. Por eso es necesario trazar una política de más largo aliento, que además de seguir en la misma línea con esos propósitos, sea consecuente con el enorme potencial de Colombia en energías renovables alternativas no convencionales, donde la energía hídrica siga siendo la base.

Viendo entonces un panorama de la energía hídrica en Colombia, podemos concluir algunas cosas importantes:

El reto más común al que se enfrenta el país es la dificultad de conocer qué caudal exacto tendrá el río, puesto que dependemos de los ciclos meteorológicos (periodos secos vs. húmedos). Hay que seguir aprovechando la infraestructura existente en materia hidroenergética, y quizá ampliar y mejorar las represas que así lo permitan sin afectar la naturaleza, y al mismo tiempo desarrollar fuentes renovables no convencionales; la ruta de crecimiento de la capacidad instalada de generación de manera amigable con el medio ambiente, aunque trae muchas ventajas, no puede seguir dependiendo exclusivamente del recurso agua, no solo porque las comunidades ligadas fuertemente al desarrollo e implementación de estos proyectos serían el talón de Aquiles y con razones suficientes y justas sino además porque las hidroeléctricas podrían no dar abasto en medio de fenómenos naturales imparables de cambio climático, como el fenómeno del niño.

Este tipo de proyectos son económicamente viables a largo plazo, pero los impactos ambientales también están en primer lugar en el foco de las consideraciones nacionales a la hora de proponer procesos para la implementación de este tipo de tecnología; la construcción de presas o sistema de retención del caudal del agua, si no se proyectan de forma sostenible y ordenada, suponen grandes cambios y modificaciones en los elementos del ecosistema, y para obtener este tipo de energía los perjuicios sobre la flora y la fauna del entorno pueden ser irreversibles.

El país ha venido trabajando en el marco operativo y regulatorio para articular adecuadamente las diferentes fuentes de generación, con el fin de lograr una adecuada complementariedad. Es de resaltar que el agua permanece como el recurso dominante en Colombia dentro de la composición energética. Colombia dio el primer paso para impulsar las energías renovables no convencionales en 2014, con la adopción de la Ley 1715. El tener en la matriz una porción importante de renovables no convencionales hace mucho más eficiente y robusta la matriz eléctrica, y su objetivo principal no debe perderse de vista y es que la matriz no comprometa la estabilidad y que se dé continuidad a la demanda de energía del país, teniendo en cuenta que supone grandes retos en cuanto a sostenibilidad y confiabilidad.

En la última década, el Producto Interno Bruto (PIB) colombiano ha sido significativamente influido por el desarrollo e incremento de los servicios públicos nacionales, de forma muy particular por el relativo al sector energético, de tal manera que se ha constituido como uno de los ejes rectores de la economía nacional. Dando una mirada a los esfuerzos de ciertos gobiernos nacionales y del Congreso de la República, en especial con proyectos hidroeléctricos, han

procurado delinear para Colombia una ruta energética poco convencional. Tales medidas respondieron con éxito, entre otras ideas, a las de generar empleo, desarrollar un buen negocio social en el campo – proveedor de la materia prima, aminorar la dependencia de combustible extranjero y mejorar la calidad del aire que respiran los colombianos.

Finalmente, las proyecciones y proyectos que tiene el país muestran que en el futuro cercano esta energía renovable va a continuar liderando el abastecimiento de la nueva demanda de electricidad, así como en la reducción de las emisiones de CO₂. No solo contribuye a proveer un servicio energético moderno y asequible más allá de la conexión física del servicio y su disponibilidad, sino que además ofrece uno de los costos más bajos de todas las tecnologías de generación, por ello la implementación de esta tecnología a nivel nacional pese a los altibajos que se presentan en especial en las etapas de desarrollo, siguen siendo y seguirán siendo una alternativa fuerte para la matriz energética de Colombia y serán la base de las nuevas tecnologías de fuentes renovables del país.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Distinguir y mostrar el panorama actual de la generación hidráulica en Antioquia ante el crecimiento de la demanda de energía

4.2 Objetivos específicos

- I. Realizar un estado del arte de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs) en Antioquia para ilustrar el progreso de la matriz energética en el país como pilar del desarrollo de los procesos productivos, del avance social y los adelantos que trae consigo en el sector ambiental y económico, el aporte a las energías renovables y las mejoras en eficiencia energética.
- II. Buscar en bases de datos en qué rangos se encuentran las centrales hidroeléctricas de Antioquia o Colombia y realizar una tabla interactiva donde el usuario pueda buscar la central por nombre, ubicación, fecha, potencia y proyectos vigentes.
- III. Investigar los tipos de turbina más utilizados en Colombia en las centrales hidroeléctricas.

5. Desarrollo del Estado del Arte

5.1. Energía eléctrica

5.1.1. *Cómo se genera la energía eléctrica*

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos y obtener trabajo; es una fuente de energía renovable que se obtiene mediante el movimiento de cargas eléctricas que se produce en el interior de materiales conductores (UPME., 2015) y que puede transformarse en muchas otras formas de energía, como luz, energía mecánica y energía térmica. La electricidad entonces es una propiedad fundamental de la materia originada en las partículas que la componen, y se puede manifestar tanto en reposo (electricidad estática) como en movimiento (corriente eléctrica) (MinEducación, s.f). La generación de electricidad, en términos generales, consiste en transformar alguna clase de energía, “no eléctrica” (química, mecánica, térmica, luminosa, etc.) en energía eléctrica.

Para su generación a nivel industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas, las cuales ejecutan alguna de las transformaciones mencionadas, y constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico.

La energía eléctrica se obtiene por procesos basados en el principio de Faraday, este físico inglés intuyó que los campos magnéticos podían producir electricidad, de manera que colocó un disco de cobre, en forma de herradura, entre los dos polos de un imán, y lo hizo girar, movimiento que indujo una corriente eléctrica en el disco. En las centrales de producción de energía eléctrica actuales lo que gira es una turbina (bobina) a grandes velocidades, que comunica su movimiento a un grupo de imanes que permanecen fijos, al girar, estos imanes modifican la posición del material conductor respecto a las líneas de fuerza del campo magnético, induciendo una corriente eléctrica en el conductor, es decir, el campo magnético resultante moviliza los electrones del material conductor creando un flujo de energía que luego deberá ser preparada para su distribución mediante una serie de transformadores (Etecé, 2022)

La energía que impulsa las turbinas en las centrales de generación eléctrica puede ser de muchos tipos: nuclear, hidráulica, térmica, solar, eólica, etc.; cada una de las cuales está sujeta por ley a un régimen determinado. (López, 2002)

En este sentido, hay dos grandes grupos de centrales:

- **Centrales de régimen ordinario:** se dedican exclusivamente a generar electricidad a gran escala.
- **Centrales de régimen especial:** tienen una alta eficiencia energética, con energías renovables o con un bajo impacto ambiental.

5.1.2. Centrales en régimen especial

En los últimos años, se ha intensificado la producción de electricidad mediante fuentes de energía renovables, que tienen un menor impacto ambiental que las convencionales y una elevada eficiencia energética. La ley incluye estas fuentes en un régimen especial debido a que permiten un significativo ahorro energético, reducción de la dependencia del petróleo y de otros combustibles fósiles y la reducción de las emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x.

En este tipo de centrales están incluidas las centrales de energía solar fotovoltaica, energía eólica, de combustión de residuos, de aprovechamiento de biomasa, de cogeneración y las pequeñas centrales hidroeléctricas. Estas centrales han sido una verdadera alternativa a las centrales convencionales, ya que tienen unos rendimientos energéticos muy elevados y, en algunos casos, permiten que pequeños consumidores produzcan su propia energía eléctrica e, incluso, sean autónomos desde un punto de vista energético (López, 2002). La Tabla 1 muestra la potencia en MW de las centrales en régimen especial.

Tabla 1. Potencia de las centrales en régimen especial (López, 2002)

Tecnología	Potencia en servicio [MW]	Potencia solicitada [MW]
Biomasa	2,291	2,291
Cogeneración	1.078,077	1.561,260
Eólica	59,495	3.069,875
Fotovoltaica	75	180
Hidroeléctrica	199,668	235,404
Reducción de residuos	34800	401,000
Residuos	44,060	90,424
Total	1.418,466	5,360,434

Es importante resaltar que la energía eléctrica no es un producto que se encuentre en la naturaleza, sino que se genera a partir de diferentes energéticos ya sean primarios o secundarios.

Las fuentes de energía primarias son las que se obtienen directamente de la naturaleza por ejemplo el viento, el sol, el agua en movimiento, la biomasa, el uranio, el petróleo, gas y carbón. Por otra parte se entienden por secundarias los flujos energéticos que se obtienen a partir de la transformación de alguna de las fuentes primarias, por ejemplo electricidad, hidrógeno y los combustibles (YPF, 2022)

Cada país diseña su parque de generación eléctrico en función de los recursos en los que es abundante, de los costos asociados, de la posibilidad de importar el recurso primario o secundario necesario, de los objetivos ambientales, de la seguridad de suministro, entre otros. (Gómez, 2018)

5.1.3. Usos de la energía eléctrica

En el hogar, en los servicios, en la industria o, incluso, en el transporte, la energía eléctrica tiene un amplio abanico de aplicaciones. Con la electricidad, se puede iluminar, obtener calor y frío, calentar agua, cocinar, o poner en marcha un aparato. Solamente se ha de disponer de un enchufe o interruptor conectado a la red, de una batería o de un motor para permitir el paso de la corriente eléctrica y extraer la energía contenida en los electrones. (López, 2002)

5.1.4. Usos por sector

- ***En el hogar y en los servicios:***

La cocina, el horno, la lavadora, el lavavajillas, la nevera, el congelador, la plancha, la secadora, el televisor, el computador, el microondas o el equipo de aire acondicionado son algunos de los aparatos accionados con corriente eléctrica que pueden encontrarse en el hogar, en el comercio o en los servicios colectivos, como hospitales y escuelas. Sólo hace falta disponer de un enchufe conectado a la red eléctrica para que cualquier aparato eléctrico pueda ser accionado y proporcione un servicio, bien sea en forma de calor, aprovechando la propiedad de alguno de sus elementos de ofrecer resistencia al paso de corriente eléctrica y calentarse, o en forma de trabajo al ser accionado por un motor eléctrico. También se emplea para climatizar las viviendas o los lugares de trabajo, estos acondicionadores pueden proveer frío en verano o funcionan como bomba de calor para el invierno.

- ***En el sector industrial:***

La energía eléctrica representa aproximadamente un 30% del total de energía que se consume, se utiliza, tanto como fuente impulsora de los motores eléctricos de las máquinas y aparatos propios de cada sector, como para calentar los contenidos de tanques, depósitos o calderas. Como en el sector doméstico, la electricidad es la principal fuente de iluminación y permite obtener calor y frío con equipos de climatización. Los métodos de calentamiento se basan en la generación externa de calor y su transmisión por conducción, convección o radiación, o en la generación interna, mediante el método de la inducción. Sectores como el de los transformados metálicos, el del vidrio o el del cemento, y los materiales de construcción, aplican estas tecnologías eléctricas en sus procesos de producción.

- ***En el transporte:***

El metro o el tren son en la actualidad especialmente diseñados para el transporte público urbano, que es donde demuestran sus mejores cualidades a nivel ambiental, acústico y energético. Los modernos metros, por ejemplo, tiene un consumo energético de un 30% menos por pasajero que un autobús urbano, además de ser silencioso. Las previsiones futuras sobre el aumento del número de vehículos, el incremento de los problemas de contaminación, y la congestión de las ciudades, han planteado la utilización de fuentes de energía alternativas a los combustibles convencionales y han estimulado el interés por los vehículos eléctricos, ya que representan un ahorro de energía procedente del petróleo y una reducción de los impactos ambientales y acústicos asociados a los motores de combustión interna; actualmente, se han diseñado vehículos eléctricos destinados especialmente en usos urbanos, que pueden sobrepasar los 100 km/h de velocidad con una autonomía de funcionamiento de unos 130 km. Hay también vehículos denominados “híbridos”, en los que el motor eléctrico se combina con un motor de explosión, de manera que tiene las ventajas de las dos fuentes de energía

5.2. Energía renovable y no renovable

Las fuentes naturales de energía pueden clasificarse en energías renovables y no renovables.

La Figura 1 muestra los diferentes tipos de energías renovables y no renovables.



Figura 1. Tipos de energías. Fuente: Servicios energéticos Remica

Energías renovables

Las energías renovables son el presente y el futuro de la producción mundial de electricidad. El término «renovable» se refiere a la disponibilidad de estas en la naturaleza y su capacidad de regeneración continua, sin intervención humana, de manera espontánea y en cantidades inagotables. (Vivanco, 2020).

Un ejemplo de estas energías son el sol, la fuerza del viento o del agua y el calor de la tierra, todas ellas, están presentes en la naturaleza de manera abundante y generalizada, para generar electricidad (Enel, Energía verde: presente y futuro de la electricidad, 2022). Algunas de las ventajas que traen consigo estas energías es que, comparadas con la producida por las fuentes convencionales, son capaces de reducir drásticamente los niveles de emisiones, ayudan a reducir la dependencia de suministros externos, y fomentan el desarrollo tecnológico y la creación de empleo (TotalEnergies, 2021).

Producir cada vez más energía renovable y abandonar las fuentes convencionales es una necesidad que comparten todos los países del mundo.

El uso de energías renovables se desarrolla básicamente en dos direcciones: producir energía a partir de fuentes renovables, con el objetivo de modificar el equilibrio de la matriz energética mundial a favor de las renovables, y ayudar a que las personas de todos los rincones del mundo tengan acceso constante y seguro a la electricidad. En los países en desarrollo, la energía renovable suele ser la única forma de electrificar zonas rurales enteras. Una solución innovadora,

capaz de proporcionar a las comunidades desfavorecidas un acceso estable y seguro a la red eléctrica, cuyo objetivo es salvar la brecha en el acceso a la energía y garantizar que todo el mundo tenga las mismas oportunidades de desarrollo. Los tipos de energías renovables se clasifican a continuación en 6 tipos (Vivanco, 2020) (TotalEnergies, 2021):

- i. **Energía hidráulica:** es el caso del agua que por efecto de la energía potencial gravitatoria desciende de las montañas formando cursos de agua como ríos. El movimiento del agua río abajo genera energía cinética. Esta energía potencial se transforma en energía hidroeléctrica al pasar por turbinas de generación eléctrica.
- ii. **Energía marina o de movimiento de aguas oceánicas:** El movimiento de las aguas marinas en océanos y mares son un almacén interminable de energía cinética, y que, utilizando la tecnología apropiada, es posible transformarla en energía eléctrica. La energía marina puede ser: mareomotriz (energía de la diferencia de mareas), undimotriz (energía del movimiento de las olas) y conversión térmica (energía que utiliza la diferencia térmica de los océanos).
- iii. **Energía Eólica:** se refiere a la energía contenida en las grandes masas de aire que se desplazan por la superficie del planeta producto de la acción del Sol. Es así, que la energía cinética de las masas de aire se convierte en energía mecánica para luego transformarse en energía eléctrica en una turbina eólica.
- iv. **Biomasa / materia orgánica:** es la energía del Sol almacenada en la materia orgánica. Como es sabido, las plantas y algunos microorganismos tienen la capacidad de guardar esta energía en forma química mediante el proceso de la fotosíntesis. El proceso básicamente utiliza luz solar, agua y el CO₂ troposférico, para formar moléculas orgánicas compuestas de carbono, hidrógeno y oxígeno.
- v. **Energía solar:** es la energía proveniente de la radiación electromagnética del Sol. En este caso, a diferencia del caso anterior, se usa directamente mediante las tecnologías desarrolladas para este fin. Esta energía, en forma de calor y luz, puede aprovecharse por medio de células fotoeléctricas, heliostatos o colectores solares, que la convierten en energía eléctrica o térmica.

- vi. **Energía geotérmica:** esta energía aprovecha las altas temperatura que emergen desde las capas interiores del planeta. Esta energía se manifiesta normalmente como géiseres, fumarolas, pozos de lodo hirviendo, volcanes y fuentes termales. Este calor es utilizado tanto para la generación de electricidad o bien como energía térmica.

Energías no renovables

Son aquellas fuentes energía de uso limitado, que una vez consumido se agota el abastecimiento. En general, el ritmo de uso es mayor a su regeneración. Entre las fuentes de energía no renovables están los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, y a diferencia de las renovables tardan cientos de millones de años en formarse.

- i. **Combustibles fósiles:** es biomasa de tiempos milenarios sometida a procesos de transformación por presión y temperatura. Son combustibles fósiles el carbón, el petróleo y el gas natural y licuado del petróleo.
- ii. **Energía nuclear o atómica o energía proveniente del átomo:** esta energía proviene del proceso de fisión nuclear del núcleo de uranio. Al momento de la división del núcleo se libera una gran cantidad de energía en forma de radiación y calor utilizada para generar electricidad o energía termonuclear.

El uso de combustibles fósiles (carbón y petróleo, principalmente) genera contaminación atmosférica como principal externalidad negativa del proceso, ya que, al producir energía al quemarse, provoca emisiones dañinas en forma de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, óxidos nitrosos, material particulado, mercurio, vanadio y níquel. (Unidas, 2022). El impacto del proceso puede ser local, regional y global.

5.2.1. Usos de las energías renovables y no renovables: Contexto internacional

A nivel internacional aún existe una gran dependencia de las fuentes no renovables como el carbón y los derivados del petróleo, sin embargo, muchos países están implementando leyes y tecnologías para hacer las transiciones energéticas a fuentes no convencionales de energía y de esta

manera ser más amigables con el ambiente y tener recursos energéticos suficientes y duraderos en el tiempo sin mayores afectaciones a nivel social, económico y ambiental.

La distribución que se muestra en la Figura 2, indica que para el año 2018 más del 60% de la energía utilizada en el mundo aún sigue siendo de origen no renovable (Appa, 2018).

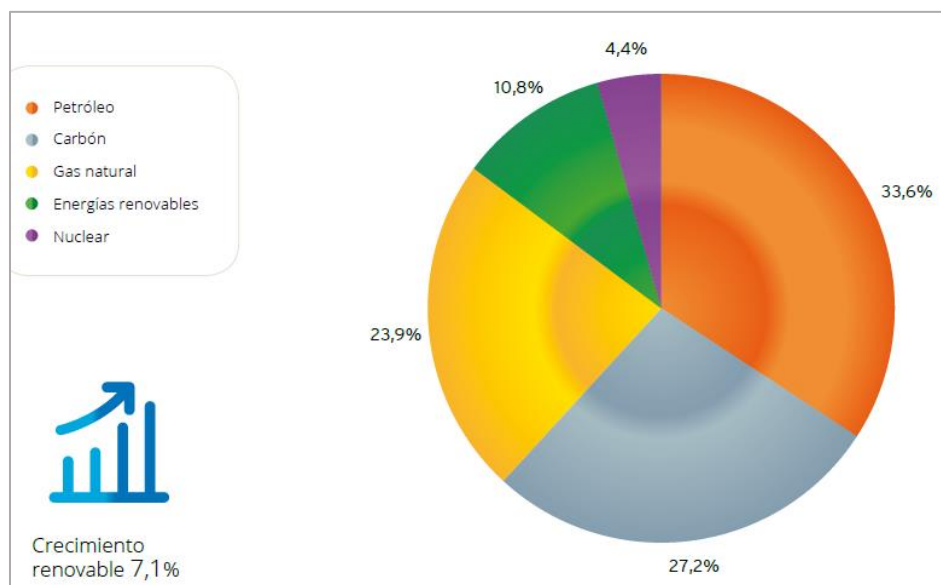


Figura 2. Distribución energética a nivel mundial. Fuente: Appa, 2018

Aproximadamente el 81% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles, mientras que el 19% restante proviene de fuentes renovables. Actualmente, estas últimas se encuentran asociadas principalmente con el uso tradicional de la biomasa en aplicaciones como la leña para cocción de alimentos y calentamiento de espacios, y la hidroenergía para generación eléctrica.

En una menor medida, se aprovecha la energía proveniente de fuentes como el sol, la geotermia y la biomasa para su conversión en energía térmica a través del uso de tecnologías relativamente modernas, seguidas de estas y otras fuentes como la eólica para la generación de energía eléctrica. Finalmente, se suman al aprovechamiento de fuentes renovables el uso de biocombustibles en el sector transporte y tecnologías en etapas incipientes de desarrollo como es el caso de la energía de los mares en forma de mareas, oleaje, gradientes térmicos o gradientes salínicos (REN21, 2014)

China, Alemania, España, y Estados Unidos, se consolidan hoy en día como países pioneros en el desarrollo de las mayores capacidades instaladas en tecnologías para el aprovechamiento de

la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y biomasa, como fuentes de origen renovable que hacen su aporte en el proceso de transición planteado en lo que a la generación de energía eléctrica se refiere. Entre tanto, países como Estados Unidos, Brasil y Alemania lideran la utilización de bioenergía en el sector transporte (REN21, 2014) en tanto que Estados Unidos, Noruega, China, Japón y la Comunidad Europea lideran la utilización de electricidad (en parte producida a partir de fuentes renovables) en ese mismo sector (Ecomento, 2014); (europea, 2012) y otros países como China, Estados Unidos y Turquía lideran el aprovechamiento de energía térmica en forma de calor útil a partir de la energía solar y la energía geotérmica (REN21, 2014)

Dada la disponibilidad de al menos una de las fuentes renovables anteriormente mencionadas en cualquier posición geográfica del planeta y la abundancia relativa de una o varias de estas fuentes en algunas regiones favorecidas, las fuentes de energía renovables representan a su vez inmensos potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera costo-efectiva en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos 40 años (Táutica, 2015).

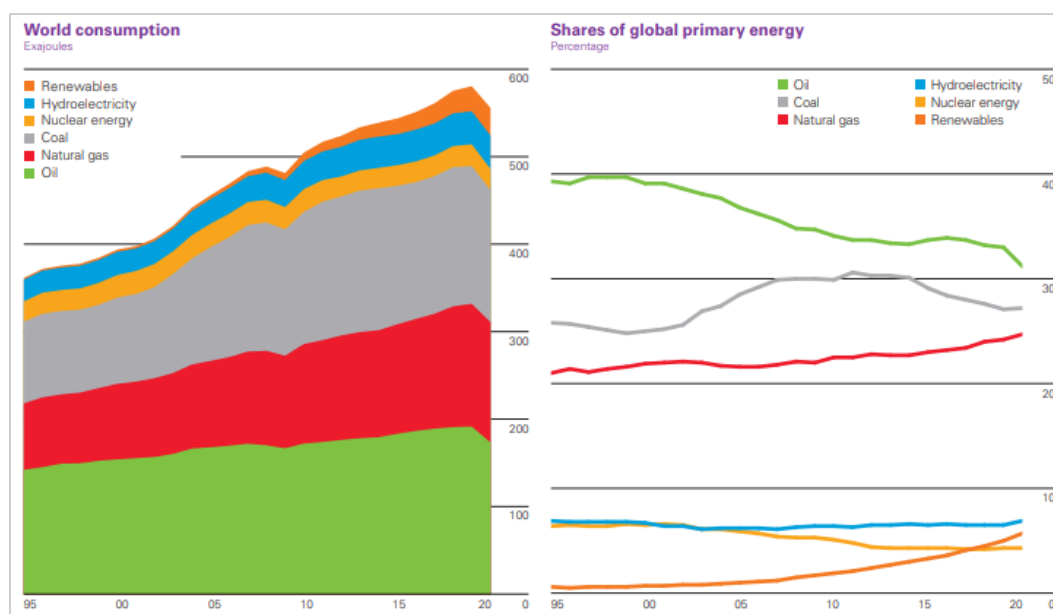


Figura 3. Distribución y consumo energético mundial. Fuente: Táutica, 2015

La Figura 3, muestra el consumo de energía primaria a nivel mundial; Según el reporte dado por (Looney, 2021), para el año 2020 el consumo de energía a nivel mundial disminuyó un 4,5%; dicho descenso estuvo impulsado en gran medida por el petróleo (-9,7%), que representó casi las tres cuartas partes de la disminución, además el consumo de todos los combustibles para

ese año disminuyó, excepto las renovables aumentando 9,7% y la hidráulica aumentando en 1,0% respecto al año anterior. El consumo con mayores descensos se observa en América del Norte, Europa, Asia-Pacífico y un crecimiento de consumo en China; en el resto de las regiones, la caída del consumo para el 2020 estuvo oscilando alrededor de 7,8 %, para América del Sur y Central, y alrededor de 3.1% en el Medio Oriente (Looney, 2021).

En cuanto al petróleo y sus derivados, este sigue siendo el energético con mayor demanda y consumo, mostrando un poco más de 30%; el carbón por su parte fue el segundo combustible más importante en 2020, representando el 27,2% aproximadamente, del consumo total de energía primaria. La participación tanto del gas natural como de las energías renovables aumentó a máximos históricos del 24,7 % y el 5,7 %, respectivamente. Finalmente, se observa que las energías renovables para este año superaron a la energía nuclear y que la participación de energía hidroeléctrica aumentó en 0,4 puntos porcentuales, el primer aumento desde 2014.

En este orden de ideas, al observar la Figura 4 el petróleo sigue siendo el combustible dominante en África, Europa y América, mientras que el gas natural domina en Oriente Medio, y representa más de la mitad de la matriz energética en esta región. Por otro lado, el carbón es el combustible dominante en la región de Asia Pacífico. En 2020, la participación del carbón en la energía primaria cayó a su nivel más bajo en nuestra serie de datos en América del Norte y Europa al 12 % y al 9 %, respectivamente.

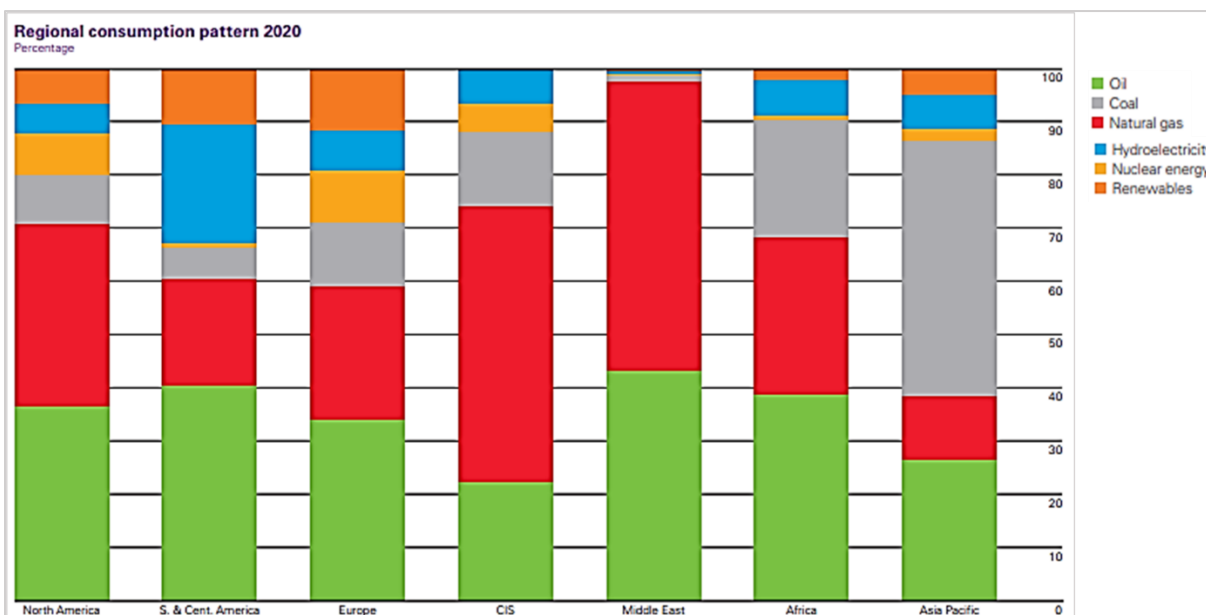


Figura 4. Consumo de energéticos por regiones a nivel mundial. Fuente: Táutica, 2015

5.2.2. Usos de las energías renovables y no renovables: Contexto nacional

En Colombia, la distribución energética es variada, aunque el uso de fuentes no renovables aun abarca un porcentaje significativo en la matriz, las fuentes no convencionales están siendo implementadas y promovidas a través de leyes e incentivos que permiten que la energía producida cada vez sea más limpia.

Colombia es un país que goza de una matriz energética relativamente rica tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables. Actualmente, la explotación y producción energética del país está constituida a grandes rasgos en un 93% de recursos primarios de origen fósil, aproximadamente un 4% de hidroenergía y un 3% de biomasa y residuos. De esa explotación primaria, el país exporta aproximadamente un 69%, principalmente en forma de carbón mineral y petróleo, y utiliza un 31% del cual, cerca del 78% corresponde a recursos fósiles y el 22% a recursos renovables.

El país depende entonces en cerca de un 78% de combustibles fósiles que hoy en día está en capacidad de autoabastecer y cuyos niveles de producción a 2013 indican reservas suficientes para cerca de 170 años en el caso de carbón, del orden de 7 años para el petróleo y 15 años para el gas natural (UPME., 2015). Dada la baja participación del carbón en la canasta energética doméstica, y la alta participación de combustibles líquidos derivados del petróleo y del gas natural,

aun contando con el descubrimiento de nuevas reservas de estos recursos, el desarrollo de fuentes alternativas locales de energía que puedan sustituir por lo menos parcialmente el uso de estas fuentes en el transcurso de las próximas décadas cobra relevancia para satisfacer la demanda energética doméstica futura, a fin de no tener que ceder a una alta dependencia en la importación de estos energéticos convencionales en el largo plazo (Figueroa, 2022), (REN21, 2014).

Es importante tener en cuenta que los usos de los energéticos mencionados (petróleo y gas natural) se encuentran principalmente concentrados en los sectores de consumo correspondientes al transporte y la industria. Entre tanto, la matriz eléctrica, que produce aproximadamente un 17% de la energía final consumida en el país, cuenta con la amplia participación de la energía hidroeléctrica como recurso renovable, que representa entre el 70% y 80% de la generación, según variaciones en la hidrología anual, y el 70% de la capacidad instalada a diciembre de 2014 (Táutica, 2015).

La Figura 5 tomada de (UPME, Demanda y Energía, 2022), muestra la distribución de producción de energía primaria por energético en el país para los años 2018, 2019 y 2020.

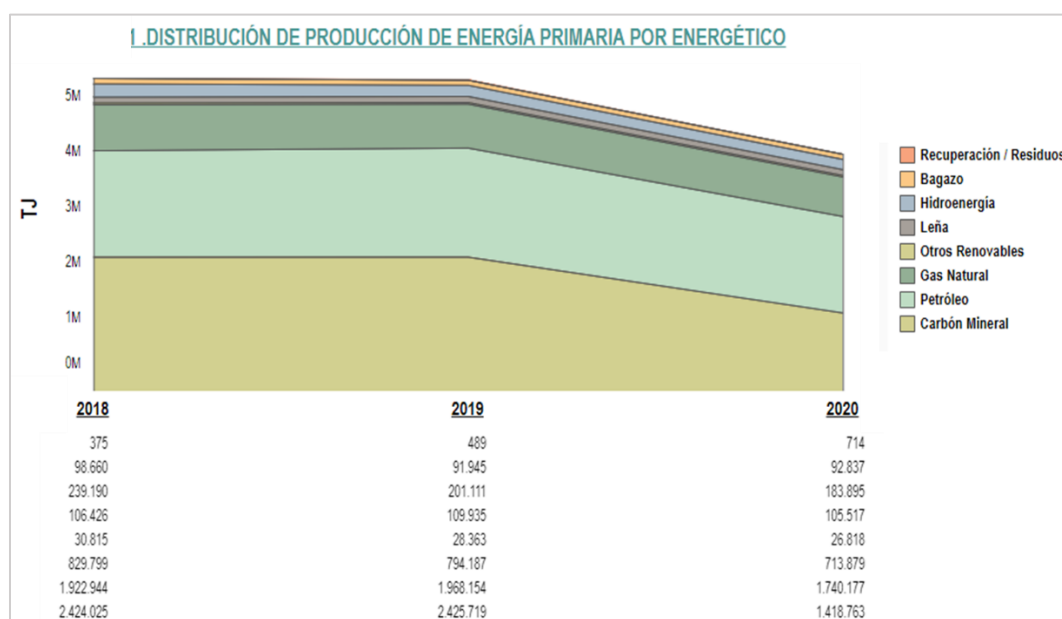


Figura 5. Histórico de distribución de producción de energía primaria por energético en Colombia. Fuente: UPME, 2022

En Colombia, para 2021, se consumió 46% de petróleo y derivados, 16% de gas natural, 7% de carbón y 14% de biomasa y leña. Estos energéticos son consumidos por los diferentes sectores económicos, el 44% por el sector de transporte, 28% por el sector industrial, 19% por el sector residencial, 6% por el sector terciario y 3% por otros sectores (Buitrago, 2022)

La Figura 6, muestra la capacidad efectiva por tipo de generación en MW para Colombia en el 2022 (BECO, 2022)

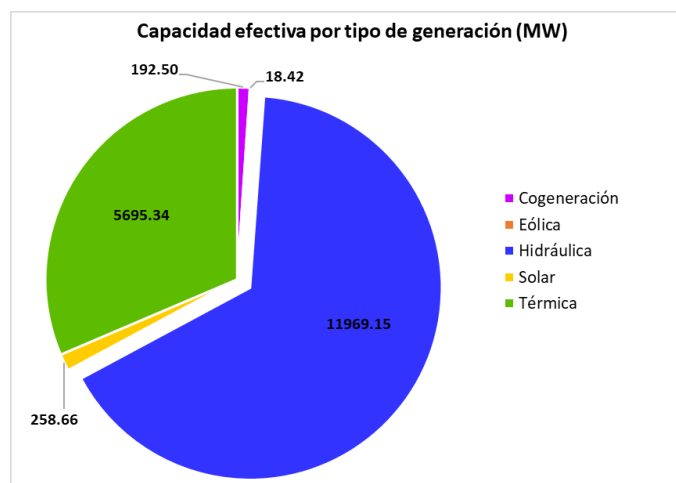


Figura 6. Capacidad efectiva por tipo de generación para Colombia en el año 2022. Fuente: BECO, 2022

Es importante notar que para Colombia, la matriz energética está compuesta en casi 70% por fuentes hidráulicas, lo que genera una dependencia a los aportes hídricos; sin embargo, el país viene cada vez más está efectuando estrategias de implementación y masificación de fuentes limpias como lo son las iniciativas de hidrógeno verde, proyectos eólicos y proyectos de energía solar, ello le aporta estabilidad y confiabilidad al sistema, al no transferir la dependencia hacia un único tipo de energía. Según el ministerio de minas y energía, Colombia se encuentra en el puesto 13 a nivel mundial de los países con mayor aporte de energía proveniente de fuentes renovables llegando a un 25% del total de su matriz energética, superando a países como Suiza que registra un 23.8% (Soto, 2022).

5.3. La energía en Colombia

Desde hace ya algunos años la generación de energía eléctrica en el país está sujeta a los recursos hídricos y son sin duda la fuente de energía más importante que tiene Colombia. Aun cuando se analizan nuevas opciones para diversificar la matriz energética con no convencionales, las hidroeléctricas continúan acaparando el 69.9% de la capacidad instalada, una cifra por encima de las térmicas que aproximadamente un 29% y las no tradicionales que alcanzan hasta 2%. (UPME., 2015)

De acuerdo con el más reciente balance de XM, operador del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia, para el 2022 la oferta de hidroeléctricas es de 11.834,57 MW una cifra que marca la columna vertebral del sistema energético por lo que Colombia tiene una capacidad neta de 17.319,59 megavatios en total. Las tecnologías utilizadas en Colombia para la generación de energía están clasificadas en fuentes convencionales y no convencionales y se describe brevemente a continuación (UPME, 2005):

5.3.1. Tecnologías para fuentes convencionales

i. Centrales térmicas a gas

- *Ciclo Simple*: aplicables a zonas interconectadas, con capacidades instaladas típicas de: 50 MW, 150 MW en una unidad y 300 MW en dos unidades de 150 MW cada una.
- *Ciclo Combinado*: aplicables a zonas interconectadas, con capacidad instalada típica de: 450 MW, obtenidos mediante dos unidades a gas de 150 MW cada una y una unidad a vapor de 150 MW.
- *Cierre de Ciclo*: aplicable a zonas Interconectadas; una unidad de vapor de 150 MW para cerrar el ciclo de una central de 300 MW conformada por dos unidades a gas de 150 MW cada una.

ii. Centrales térmicas a carbón.

No se considera ciclo abierto de enfriamiento ya que el volumen de agua que esta tecnología requiere y los impactos ambientales que conlleva, la harían no factible en casi la totalidad del país.

- *Tecnología de Carbón Pulverizado*: Capacidad instalada de 50 MW, 150 MW y 300 MW en una unidad, todas con tecnología de enfriamiento en ciclo semihúmedo. Dada las capacidades instaladas estas centrales se consideran exclusivamente para zonas interconectadas.
- *Tecnología de Lecho Fluidizado*: Capacidad instalada de 150 MW en una unidad, con tecnología de enfriamiento en ciclo semihúmedo.

Igualmente, aplicable a zonas interconectadas. Así mismo se considera una planta de 150 MW de capacidad operando con mezcla de carbón y biomasa.

iii. Centrales térmicas a diésel o fuel oil

En este caso se considera la tecnología de motores alternantes con capacidad instalada de 2 MW, aplicable exclusivamente a centros poblados de las zonas no interconectadas. Las alternativas en esta tecnología dependen del combustible utilizado:

- Motores alternantes de 2 MW operando con Fuel oil
- Motores alternantes de 2 MW operando con diésel
- Motores alternantes de 2 MW operando con biodiesel.

iv. Hidroelectricidad

Se trata de una tecnología ampliamente conocida y aplicada en el país para un rango muy amplio de capacidades instaladas, desde algunos kW hasta más de 1000 MW. Existen innumerables posibles variaciones de configuración o esquema de los proyectos, la clasificación que sugiere la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) para este tipo de aprovechamientos lo clasifica en 5 tipos: picocentrales, microcentrales, minicentrales, pequeñas centrales hidroeléctricas y centrales hidroeléctricas

5.3.2. Tecnologías para fuentes no convencionales

i. Energía Eólica

Se definieron equipos de baja potencia para zonas no interconectadas con generador sincrónico y almacenamiento en baterías. Estas plantas son la eólica micro y eólica pequeña:

- *EMCO*: Eólica Micro con potencia nominal 1.5 kW
- *EP*: Eólica Pequeña con potencia nominal 15 kW

ii. Energía Solar

- *Generación a pequeña escala*: Son sistemas individuales y domésticos, en aplicaciones rurales aisladas, instalados sobre tejados y azoteas de casas.
- *Solar fotovoltaica 50 Wp de DC*: Suple las necesidades de un grupo familiar pequeño.

- *Solar Fotovoltaica 300 Wp de DC/AC para ZNI:* Suple las necesidades de una vivienda de mayor demanda eléctrica.
- *Generación a mediana escala:* Son sistemas centralizados, que pueden brindar soluciones energéticas a pequeñas comunidades.
- *Solar fotovoltaica 3 kWp de AC para ZNI:* Esta planta puede atender 10 usuarios (viviendas) con los servicios básicos de iluminación, un ventilador, radio grabadora, TV a color de 14" y equipo de sonido compacto.
- *Solar fotovoltaica 30 kWp de AC para SIN:* Sistemas centralizados en edificios, normalmente integrados en la arquitectura de los mismos o comunidades de vecinos.
- *Generación fotovoltaica a gran escala:* Son generalmente instalaciones conectadas a red, de superficies extensas.
- *Solar fotovoltaica 300 kWp de AC para SIN:* Centrales de generación fotovoltaica

iii. Energía Geotérmica

La planta típica seleccionada para la generación de energía eléctrica con recursos geotérmicos en Colombia es la de ciclo binario con capacidad de 5 MW (pequeña central) GT 5.

5.3.3. Generación eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional

El parque generador del país es de 150 plantas, y consecuente con la matriz energética, el 84 % son plantas hídricas, el 14 %, térmicas a carbón y gas, y el 2 %, eólicas y solar. Las fuentes eólicas se empezaron a instalar, aproximadamente en 2003, con una capacidad instalada de 19,5 MW; en la actualidad esta capacidad es de 221 MW. Mientras que la capacidad instalada con fuente solar fotovoltaica en los últimos diez años ha pasado de 9 MW (en 2010, correspondiente a sistemas privados de pequeñas soluciones en zonas no interconectadas [ZNI]) a 1018 MW en el 2019, lo que demuestra una notable evolución en la implementación de esta tecnología en el país. Estos datos indican que se puede considerar que Colombia posee una matriz mayoritariamente baja en emisiones de carbono y otros GEI. (PEN, 2015).

Conociendo lo anterior, es necesario tener en cuenta que la generación eléctrica del sistema interconectado geográficamente se encuentra concentrada en la región noroeste y centro del país, obedeciendo a la disponibilidad de los recursos energéticos primarios y a la localización de la demanda; la región andina colombiana, es donde se ubica la mayor parte de la generación hidroeléctrica, esto se puede ver en la Figura 7.

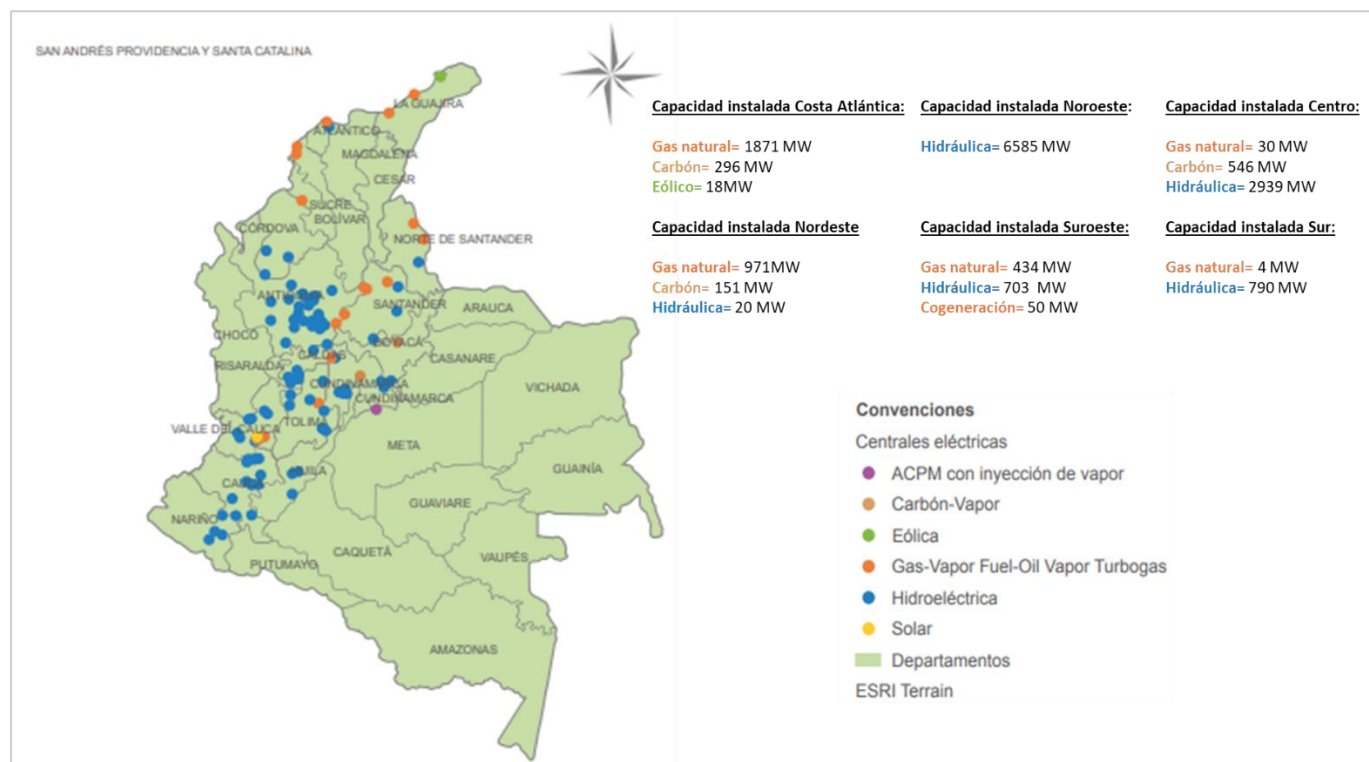


Figura 7. Generación eléctrica del Sistema Interconectado Nacional. Fuente: Macías, 2022

Actualmente, de acuerdo con las cifras oficiales del Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL), se muestra que la generación de energía del país depende en un 70% aproximadamente del recurso hídrico, el país cuenta con una capacidad instalada cerca de 14.4 GW de los cuales un 69.9% es generación hidráulica, 24.8% térmicas a gas, 4.9% térmicas a carbón, 0.4% cogeneradores y 0.1% eólicos, lo anterior se puede observar en la Figura 8 (Macías, 2022), (ACOLGEN, 2021).

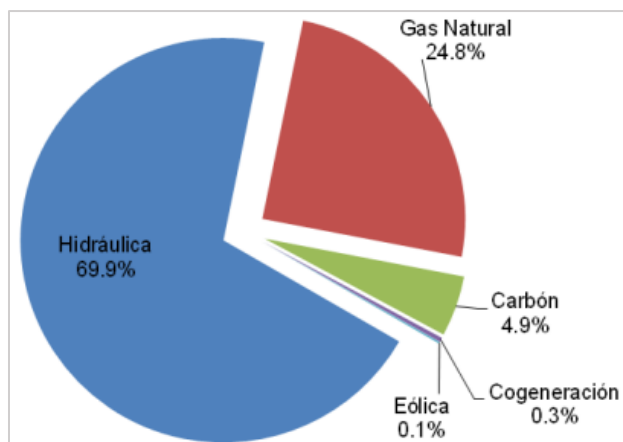


Figura 8. Distribución del parque de generación eléctrica colombiano Fuente: UPME, 2015 & Macías, 2022.

La generación de energía para el 2019 fue de 65.867,86 GWh, producida principalmente por fuentes hídricas (78,26 %) y térmicas a carbón y gas (19,80 %), condición que, en comparación con otros países, califica al sistema eléctrico colombiano como bajo en emisiones de carbono. Respecto a la generación de energía a partir de radiación solar y viento, estas sumaron 182,6 GWh, con lo cual aportaron el 0,28 % a la matriz energética del país en 2019. Vale la pena resaltar que la producción de estas fuentes equivale, en promedio, al 0,4 % dentro de la generación eléctrica de cuatro empresas, cuya representación en el mercado nacional es del 55 %, en cinco departamentos. La Figura 9, muestra la participación según la tecnología en la matriz energética colombiana para el año 2019.

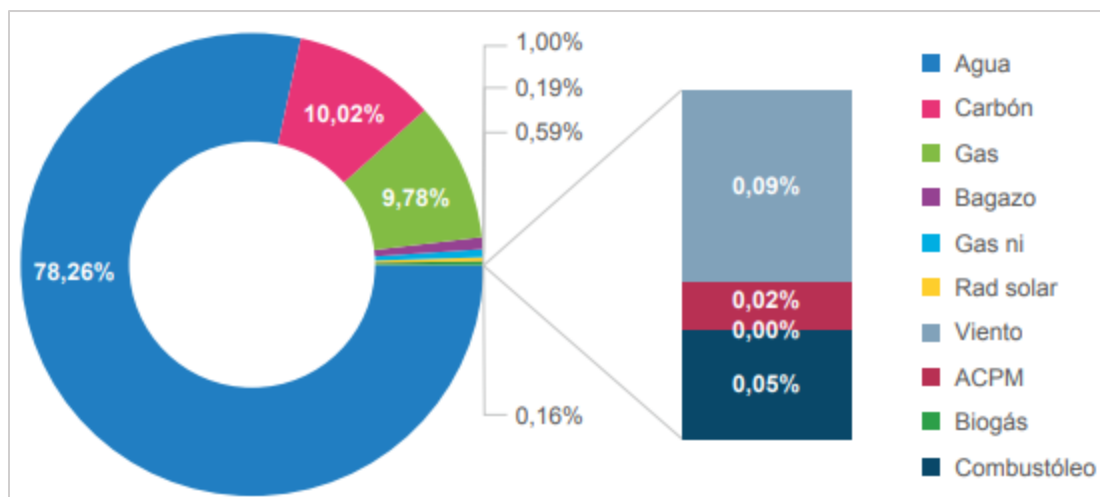


Figura 9. Participación según tecnología en la matriz energética colombiana para el año 2019 Fuente: Macías, 2022

Las nuevas normatividades en materia de generación eléctrica y las reglamentaciones que ha expedido el Gobierno desde distintos ministerios, ha permitido un mayor interés por la inversión en proyectos de generación eléctrica renovable y especialmente de las no convencionales, unido a lo anterior, la geografía montañosa del país facilita la construcción de embalses y propicia que el desarrollo del sistema eléctrico se base en generación hidráulica.

La Figura 10, muestra los proyectos aprobados a 2022 que tiene la UPME para ampliar la matriz energética Colombiana, de las cuales se puede observar que Antioquia es quien posee la mayor capacidad de generación y que como se mencionó la hidroenergía sigue siendo la tecnología de preferencia en el país. (Catorce6, 2018).

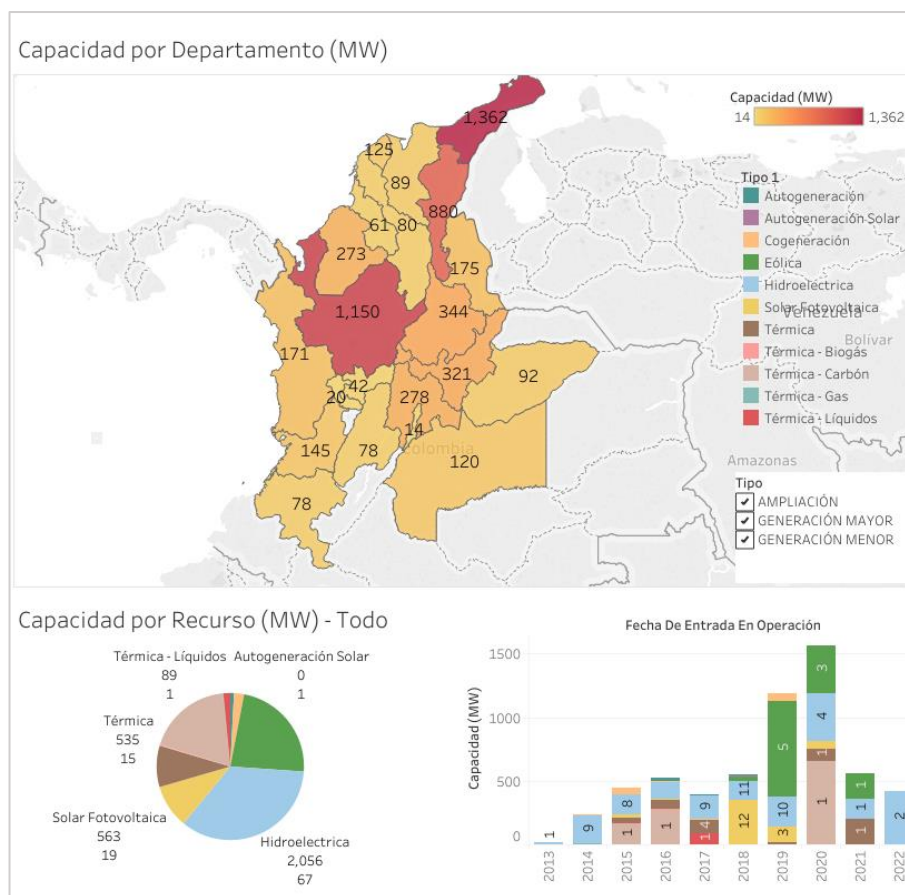


Figura 10. Proyectos aprobados a 2022 por la UPME para generación de energía eléctrica en Colombia. Fuente: UPME, 2022

En mayo de 2022 la demanda de energía fue de 6,577.69 GWh-mes, lo que representa un crecimiento del 8.92% con respecto al consumo nacional de mayo de 2021, pues fue un mes en el que, si bien se presentó un crecimiento en la demanda, fue un porcentaje menor de lo esperado.

Para el 4 de mayo del 2022, se alcanzó la demanda máxima histórica del Sistema Interconectado Nacional con un total de 225.57 GWh-día. La demanda acumulada en estos primeros 5 meses de 2022 refleja un crecimiento del 5.5% en comparación con el mismo periodo de 2021. Además, es importante notar que la región del Valle que tuvo un crecimiento en demanda de energía en mayo del 27.33% con respecto al mismo mes del año anterior; otras zonas, como el Sur del país, Guaviare, Caldas, Quindío y Risaralda, tuvieron un crecimiento entre el 10% y el 15% en comparación con mayo del año 2021. (XM, 2022).

Cabe resaltar que como resultado de las subastas, la capacidad efectiva neta del país pasará de 17.302 MW a 21.311 MW para el periodo 2022-2023, donde las fuentes eólicas y solares registrarían una participación del 6 %; si bien aumentó la capacidad efectiva a partir de fuentes hidráulicas con tres plantas, la participación de los nuevos proyectos eólicos y solares ganó el espacio perdido por las fuentes térmicas, cuya participación pasó del 64 al 30 % (con 15 plantas). Se asignaron seis plantas eólicas y dos plantas solares, ubicadas principalmente en la zona norte del país (ACOLGEN, 2021).

La capacidad efectiva neta de energía en Colombia para el periodo 2022-2023 según XM se muestra en la Figura 9 (Figuroa, 2022).

Los proyectos de generación inscritos, el 29 % están vigentes, sin embargo, se ejecuta o materializa apenas el 1 %. Si no se depuran a tiempo los proyectos no desarrollados causan una demanda “ficticia” sobre la capacidad prevista en las subestaciones, lo cual impide la entrada de nuevos proyectos, que a su vez demandan la capacidad de dichas subestaciones. El número de proyectos que han accedido a los incentivos de la Ley 1715/2014, a las FNCER suman 563 a septiembre de 2020 (ACOLGEN, 2021).

5.4. Funcionamiento de una central hidroeléctrica

El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad. A principios de la década de los noventa, las

primeras potencias productoras de hidroelectricidad eran Canadá y Estados Unidos. En todo el mundo, la hidroelectricidad representa aproximadamente la cuarta parte de la producción total de electricidad, y su importancia sigue en aumento. Los países en los que se constituye como la fuente de electricidad más importante son Noruega (99%), Zaire (97%) y Brasil (96%) (UPME, 2005)

En una central hidroeléctrica, la transformación de la energía potencial en energía cinética se logra mediante la caída del agua. El agua que cae pasa por unas turbinas que se acoplan a un generador; estas convierten la energía cinética en energía mecánica. El generador tiene como función transformar la energía mecánica en energía eléctrica, esta transformación se consigue gracias a la interacción de los dos elementos principales que lo componen: la parte móvil llamada rotor, y la parte estática que se denomina estator. Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, el rotor genera un flujo magnético que actúa como inductor para que el estator transforme la energía mecánica en energía eléctrica; de esta manera, una central hidroeléctrica es una instalación que permite el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos, para transformarlas en energía eléctrica utilizando turbinas acopladas a generadores. Después de este proceso, el agua se devuelve al río en las condiciones en que se tomó, de modo que se puede volver a usar por otra central situada aguas abajo o para consumo, lo anterior se ilustra en la Figura 11 (Ingfocol, 2022).

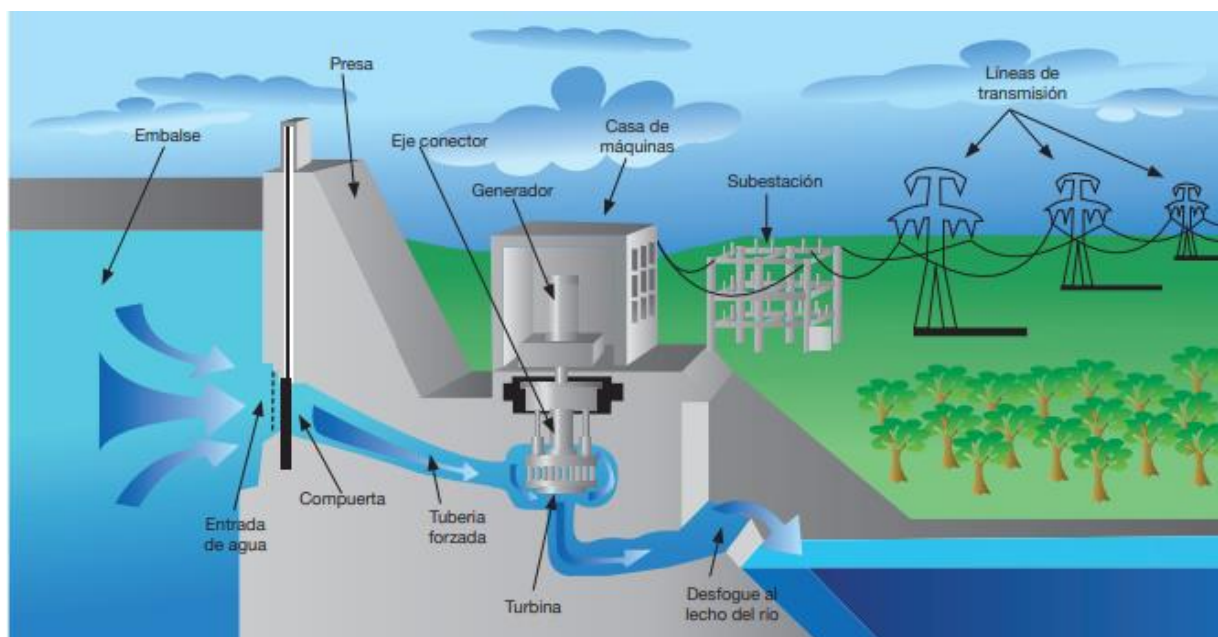


Figura 11. Central Hidroeléctrica. Fuente: Ingfocol, 2022

La función de una central hidroeléctrica como se mencionó en el párrafo anterior es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica. Un sistema de presa y captación de agua provoca un desnivel que origina una cierta energía potencial acumulada, bien sea por la altura misma de la presa o por la diferencia de niveles entre la captación y la casa de máquinas; el paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el generador y produce la corriente eléctrica.

Una de las principales características del aprovechamiento hidroeléctrico consiste en la utilización de una fuente renovable de energía sin contaminar directamente el recurso aprovechado, el cual puede ser utilizado para diversos usos tales como riego, consumo humano, entre otros.

La generación hidroeléctrica corresponde a una alternativa de alta inversión inicial, largos períodos constructivos y muy bajos costos operativos. Por otro lado, y a diferencia de la mayoría de muchos aprovechamientos energéticos, la hidroelectricidad se basa en el aprovechamiento in situ de las condiciones naturales del recurso hidráulico, conformado por dos condiciones fundamentales: el desnivel o salto disponible que puede ser suministrado parcial o totalmente por la presa y el caudal de la corriente aprovechada. Tal situación implica en muchos casos la construcción de importantes obras de infraestructura, tales como vías de acceso y líneas de transmisión para la construcción de la obra y el transporte de la energía.

Otra característica inherente al recurso aprovechado es la estacionalidad de la disponibilidad hídrica, condición de la que se puede independizar parcialmente la producción de la central mediante la construcción de grandes embalses de almacenamiento de agua. (UPME, 2005)

En Colombia, según la normatividad, en la ley 697 de 2001 se define a los pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, como “la energía potencial de un caudal hidráulico en un salto determinado, que no supere el equivalente a los 10 MW”. Mientras que la ley 1715 de 2014 menciona a la energía de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, como la “energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en los cuerpos de agua a pequeña escala”. Además de esto los clasifica como fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER) (Machado, 2015).

5.4.1. Clasificación según su potencia

El aprovechamiento hidroeléctrico se puede diferenciar en función de su potencia. Como se va a desarrollar, la potencia instalada va a determinar técnica, ambiental, económica y administrativamente las características de la instalación considerada. Tan trascendente es la diferenciación de una instalación u otra en función de la potencia que se considere, que se puede hablar de tipos de centrales hidroeléctricas por su potencia; no existe un criterio único de clasificación de las centrales hidroeléctricas, ya que los valores de clasificación pueden variar según el país. En función de su capacidad, se pueden clasificar las hidroeléctricas como se describe en la Tabla 2 (Machado, 2015) y (Sandoval, 2018). La clasificación anterior se emplea en el atlas hidroenergético de Colombia y es aprobada por la UPME y el Ministerio de Minas y Energía, cumpliendo con los criterios que indica la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) para las centrales hidroeléctricas.

Tabla 2. Clasificación de centrales hidroeléctricas en Colombia según su potencia

Tipo	Capacidad instalada	Operación	Aplicable a:
Picocentrales	Entre 0,5 y 5 kW	A filo de agua	Zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.
Microcentrales	Entre 5 y 50 kW	A filo de agua	Zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.
Minicentrales	Entre 50 y 500 kW	A filo de agua	Zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH)	Entre 500kW a 50 MW	A filo de agua	Zonas no interconectadas y zonas interconectadas
Centrales hidroeléctricas (CH)	Mayor a 50 MW	-	Zonas interconectadas, con participación obligada en el despacho eléctrico

5.4.2. Clasificación según el salto

Las centrales hidroeléctricas también se pueden clasificar según el salto como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Clasificación de centrales hidroeléctricas según el salto.

Tipo	Salto en metros		
	Bajo	Medio	Alto
Microcentrales	<15	15-20	>50
Minicentrales	<20	20-100	>100
PCHs	<25	25-130	>130

5.4.3. *Clasificación según la regulación de caudal*

Otro aspecto importante a tener en cuenta es que el aprovechamiento hidroenergético de acuerdo con la capacidad de almacenamiento o regulación de caudales, los cuales se clasifican de la siguiente manera (UPME, 2005):

- i. **Central Hidroeléctrica Filo de Agua:** También se conoce como central de pasada; en este tipo de centrales no existe una acumulación apreciable de agua "corriente arriba" de las turbinas, éstas deben aceptar el caudal disponible del río "como viene", con sus variaciones de estación en estación, o si ello es imposible, el agua sobrante se pierde por rebosamiento. En ocasiones un embalse relativamente pequeño bastará para impedir esa pérdida por rebosamiento que permite cierta flexibilidad en la operación diaria o semanal.; este tipo de central requiere un caudal suficientemente constante para asegurar a lo largo del año una potencia determinada. (Thales, s.f). Por tanto al carecer de almacenamiento apreciable de agua, la central opera permanentemente con los caudales del río, sujeta a sus variaciones estacionales, vertiendo los excesos a través del vertedero (Patarroyo, 2020).

En épocas secas se debe considerar la disminución de la potencia o la falta de la misma. Por lo general, se cuenta con tuberías de presión que toman el agua mediante bocatomas y la conducen a la casa de máquinas, para luego ser devuelta al afluente (Patarroyo, 2020). La Figura 12 y Figura 13, muestran el funcionamiento y las partes de una central hidroeléctrica a filo de agua (ISAGEN, 2017).



Figura 12. Central Hidroeléctrica a filo de agua (partes). Fuente: Elaboración propia

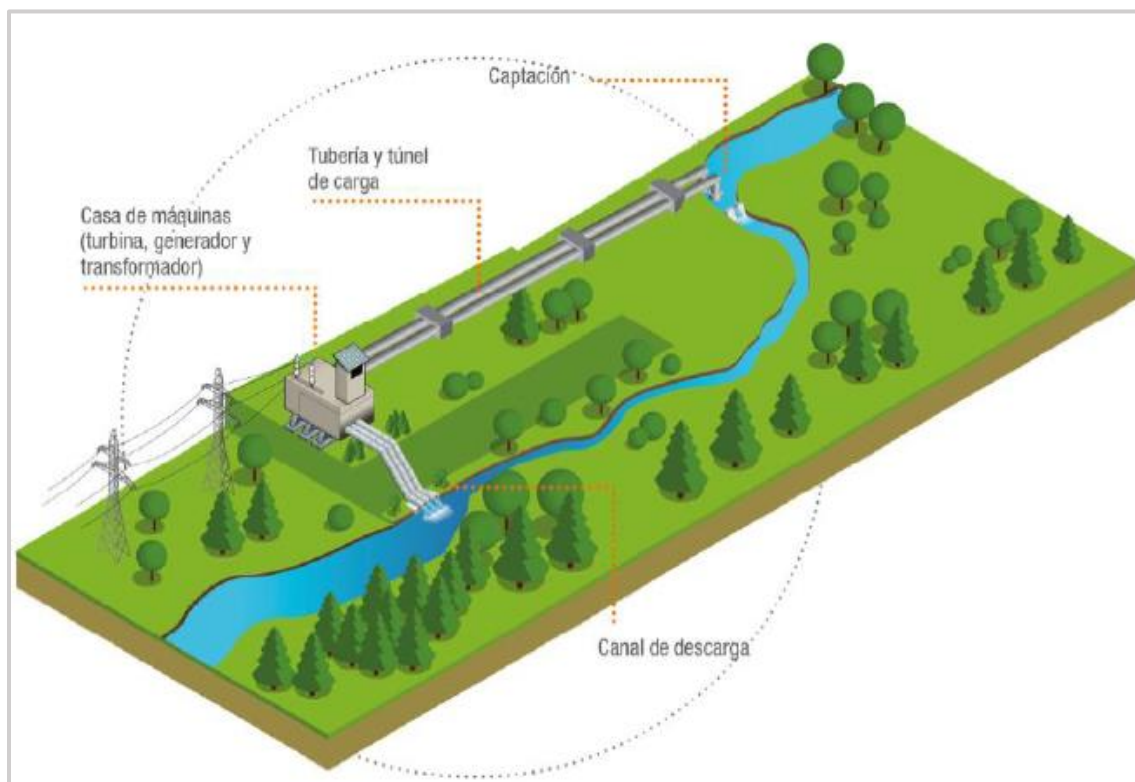


Figura 13. Central hidroeléctrica a filo de agua Fuente: CELSIA (Patarroyo, 2020)

- ii. **Central con Embalse de Regulación (Represa):** En este tipo de centrales se embalsa un volumen considerable de líquido “aguas arriba” de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales (Thales, s.f), el embalse permite regular la cantidad de agua que pasa por las turbinas, con el fin de uniformizar las variaciones temporales de los caudales afluentes en el río; del volumen embalsado depende la cantidad que puede hacerse pasar por las turbinas.

Las centrales con almacenamiento o regulación exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de filo de agua, pero permiten incrementar la producción energética y de esta forma disminuir el costo de la energía generada (Patarroyo, 2020). La Figura 14, muestra el esquema de una central hidroeléctrica con embalse.

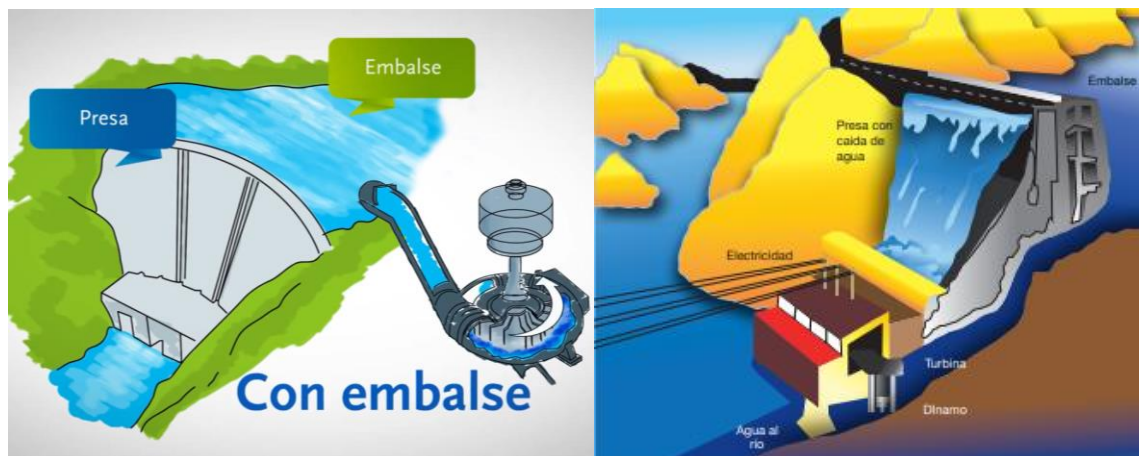


Figura 14. Central Hidroeléctrica con embalse de regulación. Fuente: Elaboración propia a partir de ISAGEN & Sandoval, 2018

De acuerdo con el esquema de aprovechamiento, pueden existir 3 variantes de este tipo de centrales hidroeléctricas con embalse (Thales, s.f):

- **Centrales de Pie de presa:** La casa de máquinas está inmediatamente aguas debajo de la presa. En este tipo de central el salto o desnivel aprovechado se obtiene exclusivamente con la presa aunque con limitaciones constructivas y debidas a la topografía de los taludes en el sitio de presa. Dependiendo de la capacidad de almacenamiento estas centrales tendrán mayor o menor regulación, incluso puede darse el caso de operar a Filo de Agua (Patarroyo, 2020).
- **Centrales de Derivación:** Aprovechan el gradiente hidráulico del río mediante un sistema de conducciones superficiales o subterráneas de menor gradiente, generándose al final de las mismas, un desnivel con respecto a la localización de la casa de máquinas (Patarroyo, 2020).
- **Centrales Hidroeléctricas de Bombeo:** Son un tipo especial de centrales hidroeléctricas que disponen de dos embalses situados a diferente nivel. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, las centrales de bombeo funcionan como una central convencional generando energía;

durante las horas del día en la que la demanda de energía es menor; el agua es bombeada al embalse superior y para ello, la central dispone de grupos de motores-bomba o, alternativamente, sus turbinas son reversibles de manera que puedan funcionar como bombas y los generadores como motores (Patarroyo, 2020).

5.5. Pequeñas centrales hidroeléctricas

Por años las hidroeléctricas han sido consideradas como sinónimo de desarrollo en todo el mundo. En Colombia, gracias a su topografía, pluviosidad y recurso hídrico por tanto, cuenta con un potencial excepcionalmente alto para desarrollar este tipo de macroproyectos de ingeniería. Son múltiples las razones que hacen que este tipo de obras sean consideradas como una opción atractiva para la generación de energía: su operación es más económica que las termoeléctricas, su construcción es menos costosa que las plantas nucleares, pueden proveer energía a gran escala y tienen el potencial de generar bajas emisiones de gases contaminantes que contribuyen al efecto invernadero.

Las PCH son un tipo de proyecto atractivo para los inversionistas debido a los beneficios de operación que ofrecen, tales como un margen de ganancia amplio, que permite un retorno sobre la inversión de manera ágil. Además, para los gobiernos se traduce en mayores ingresos por los impuestos que puede cobrar por el desarrollo de este tipo de iniciativas, tales como las transferencias, Industria y Comercio y predial (Londoño, 2017).

Lo anterior, presenta razones suficientes para que se quiera implementar en todo el mundo este tipo de tecnología. Para Colombia en varias regiones los motivos mencionados son significativos y por ello, se hayan levantado sobre importantes afluentes, centrales hidroeléctricas que suman 33 en el caso colombiano. Según la Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (ACOLGEN) actualmente la capacidad de producción del país ronda los 19000 MW y el propósito nacional es garantizar el suministro energético necesario para el desarrollo de Colombia (Rico, 2018).

Por otro lado, una central hidroeléctrica requerirá forzosamente la construcción de un embalse o de un canal en derivación, por esta razón, la obra civil y el impacto ambiental son grandes condicionantes en el diseño y construcción de estas centrales (IDAE, 2006). Ahora bien, las pequeñas centrales Hidroeléctricas (PCHs) han sido una tecnología ampliamente conocida y aplicada en el desarrollo de fuentes no convencionales de energía en Colombia, su implementación y uso abarca todo el territorio nacional, principalmente en la región Andina, y a través de los años se ha venido generando una serie de información y de datos relevantes de dichas centrales.

La importancia de la formulación de proyectos que involucran pequeñas centrales hidroeléctricas se debe a que en el futuro próximo los sistemas de potencia tendrán una alta penetración de energías renovables y generación distribuida, sin embargo, se deben tener en cuenta distintos factores para su uso eficiente, debido a que este tipo de energía tiene asociada una alta incertidumbre a causa a la naturaleza de la fuente primaria de generación. (Molina, 2017)

5.5.1. Potencia hidroeléctrica instalada (Internacional)

El suministro total de hidroelectricidad a nivel mundial para pequeñas centrales hidroeléctricas según (IEA, 2019) y (Gómez, 2020) la Figura 15, muestra un histórico a nivel mundial de generación eléctrica a partir de hidroelectricidad, es evidente que durante un tiempo significativo este tipo de tecnología tuvo un dominio amplio por parte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD). En el año 1971 en relación con el 2017 ha disminuido su porcentaje por parte de esta organización, debido a que países como China y continentes como América y África han apostado fuertemente por este tipo de generación. Factores económicos y tecnologías para el aprovechamiento de este recurso que han sido creadas a través de los años y permiten la puesta en marcha y funcionamiento de generadores de electricidad que aprovechan el recurso hídrico de manera más eficiente.

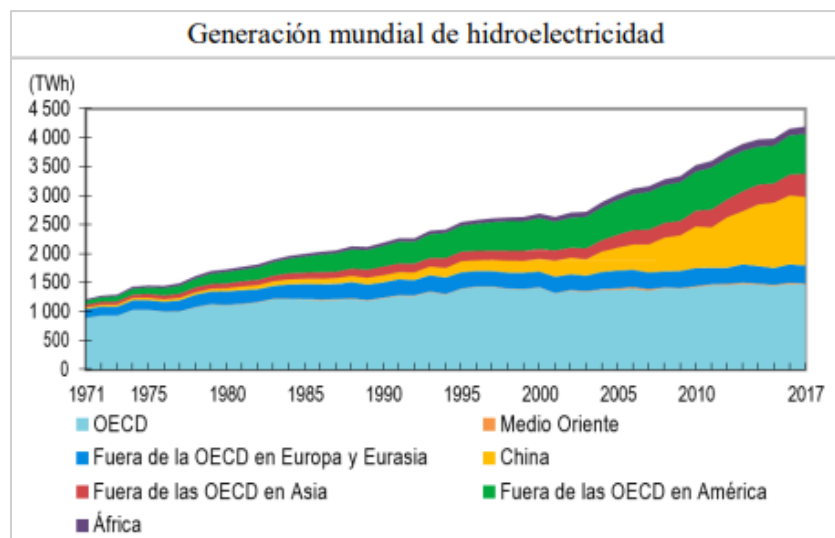


Figura 15. Generación mundial de hidroelectricidad de 1971 a 2017. Fuente: IEA, 2019

En la Figura 16 es posible observar la variación que ha tenido la generación de hidroelectricidad en el año de 1973 en relación con el 2017; para el año 1973 su valor era de 1296 TWh, cantidad que ha aumentado de forma acelerada, y que para el año 2017 es aproximadamente tres veces mayor llegando a 4197 TWh (Gómez, 2020), lo anterior, permite observar el crecimiento que ha tenido la generación de electricidad utilizando el recurso hídrico como fuente principal, en especial con la implementación de PCHs debido a que es una de las fuentes de energías renovables no convencionales (FNCER) más competitivas, eficientes y consolidadas, además de ser una tecnología que tiene más de 200 años en operación a escala global y pueden lograr una vida útil de al menos 40 años. Sólo para Europa para el año 2017 hay más de 14 mil pequeñas centrales hidroeléctricas en funcionamiento (APEMEC, 2020).

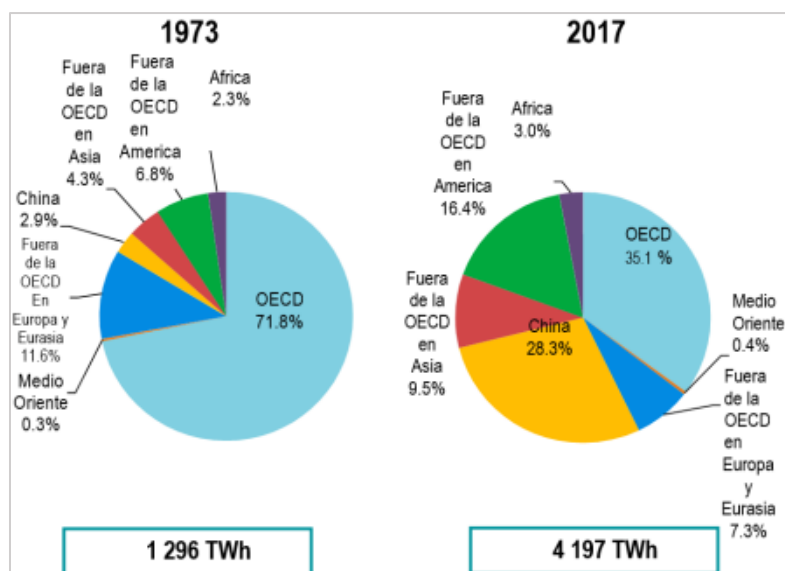


Figura 16. Porcentaje y capacidad de generación de hidroelectricidad a nivel mundial 1973 vs 2017. Fuente: IEA, 2019

Para el 2014, el desarrollo de la energía hidroeléctrica mantuvo un crecimiento estimado de 1055 GW total en el mundo, China dominó el mercado añadiendo 21,85 GW de nueva capacidad dentro de sus fronteras. Otros países también lideran el mercado en nuevas implementaciones. Estos países son Malasia (3,34 GW), Canadá (1,72 GW), India (1,20 GW), Turquía (1,35 GW), Brasil (3,31 GW) y Rusia (1,06 GW) (Machado, 2015). La Figura 17 muestra el total mundial de la capacidad hidroeléctrica instalada en GW por país en 2014.

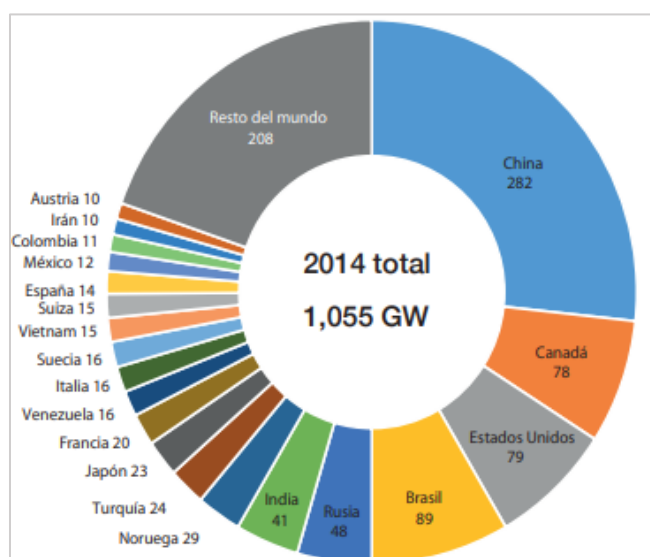


Figura 17. Total mundial de la capacidad hidroeléctrica instalada [GW] por país en 2014, Fuente: Key Trends in Hydropower

La distribución de los productores de hidroelectricidad a nivel mundial se ha dividido en diferentes grupos; como se observa en la Figura 16, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) presenta el decrecimiento más considerable debido a países como China con un crecimiento del 25.4% y en continentes como Asia fuera de la OECD donde se incrementó un 5.2% dando paso a la implementación de PCHs como forma de generación. Para el caso de América fuera de la OECD es posible observar que entre esos años hubo un aumento de 9.6%. Esto deja en evidencia que la Hidroelectricidad es una fuente de suma importancia para la generación de electricidad en continentes y países que tienen la forma adecuada de aprovechamiento del recurso hídrico, ya que la distribución en cuanto a recursos energéticos primarios permite utilizar de manera más amplia el agua como fuente efectiva de generación (Gómez., 2020).

5.5.2. Potencia hidroeléctrica instalada (Nacional)

Colombia se posiciona como uno de los países con mayor riqueza hídrica tanto a nivel global como en Latinoamérica, con una superficie de 1141.748 km² de tierras emergidas y 928660 km² de áreas marítimas como reporta el ministerio de comercio (Gómez., 2020).

Actualmente el país tiene un potencial hídrico notable para satisfacer las demandas generadas debido a su alta población, la capacidad efectiva neta del SIN al finalizar el año 2015 fue de 16420 MW. En relación con el año 2014 tuvo un crecimiento en 931 MW, equivalentes al 6%; este aumento obedece principalmente a la entrada en operación de varias centrales hidroeléctricas (XM, 2022). Para el Banco Mundial, Colombia es el cuarto país con más recursos hídricos con un caudal promedio de 66.440 m³/s, equivalente en términos generales a un volumen anual de 2.113 km³ en un área total de 1.141.748 km², teniendo en la región nororiental los menores volúmenes hídricos y la región Pacífico occidental los volúmenes más altos (Sierra, Sierra, & Guerrero, 2011). La Región Andina colombiana es donde se ubica la mayor parte de la generación hidráulica como se observa en los mapas del anexo B, además presenta niveles de lluvia que pueden ir desde los 1500 mm anuales en los valles interandinos hasta los 4000 mm al año en los altiplanos y bosques. Unido a lo anterior, la geografía montañosa facilita la construcción de embalses, lo que

propicia que el desarrollo del sistema eléctrico se base en generación hidráulica (UPME., 2015) (Gómez., 2020).

Las centrales hidráulicas en Colombia se encuentran divididas en dos categorías; las plantas despachadas centralmente y las no despachadas centralmente. Las primeras mencionadas tienen una capacidad neta mayor o igual a 20 MW, en el 2015 se encuentran en funcionamiento 28 plantas de este tipo, mientras que las no despachadas con menos de 20 MW se encuentran 115 en funcionamiento (XM, 2015). Para el país las despachadas centralmente su capacidad efectiva neta para noviembre del 2022 es de 11039 MW y las no despachadas centralmente es de 930.14 MW. Lo anterior se puede ver en detalle en el anexo A, Tabla A1 y Tabla A2 respectivamente, y en el archivo de excel DATOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS, hoja 6: *Capacidad Efectiva en Colombia por tipo de generación - Centrales hidráulicas (Despachadas y no despachadas centralmente)* (XM, 2022).

Del 69,9% de generación hidráulica para el 2020 se estimaba que correspondía a 11702 MW, en el reporte de XM de parámetros detallados para hidráulicas en el 2022 aumentó a 11969.15 MW, y reportados en el portal de indicadores (XM, 2022) la generación en el sistema interconectado nacional, para el 7 de noviembre del 2022 fue de 153.66 GWh. En 2020, 787 MW se generaban en plantas menores esto significa que aproximadamente del 100% de energía que se genera en Colombia, el 4.7 % hace referencia a las pequeñas centrales hidráulicas (Gómez., 2020). (XM, 2022) para el 8 de noviembre del 2022 reportó 124.22% de aportes hídricos los cuales corresponden a 208.25 GWh.

La Tabla 4, según el informe de registro de proyectos de generación de electricidad (UPME, 2022) muestra la capacidad instalada hidráulica en las diferentes regiones del país y su aporte histórico promedio; se observa que para la región noroeste de Colombia como es de esperarse su capacidad instalada es la mayor de todas, ya que como se mencionó en esta región se encuentra la mayor concentración de plantas hidroeléctricas instaladas.

Tabla 4. Capacidad instalada hidráulica en Regiones de Colombia

Región	Capacidad instalada hidráulica [MW]	Aporte histórico promedio [MW]
Noroeste	5585	2284
Centro	2939	1857
Suroeste	702.7	294
Sur	790	264

La Figura 18, muestra la capacidad instalada de proyectos PCH en Colombia en el año 2022, los datos detallados para cada una de las centrales hidroeléctricas y PCHs se pueden ver en el ANEXO A, Tabla A3 y en el archivo de excel DATOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS, hoja 9: *Capacidad instalada de proyectos hidráulicos (PCHs) en Colombia 2022*.

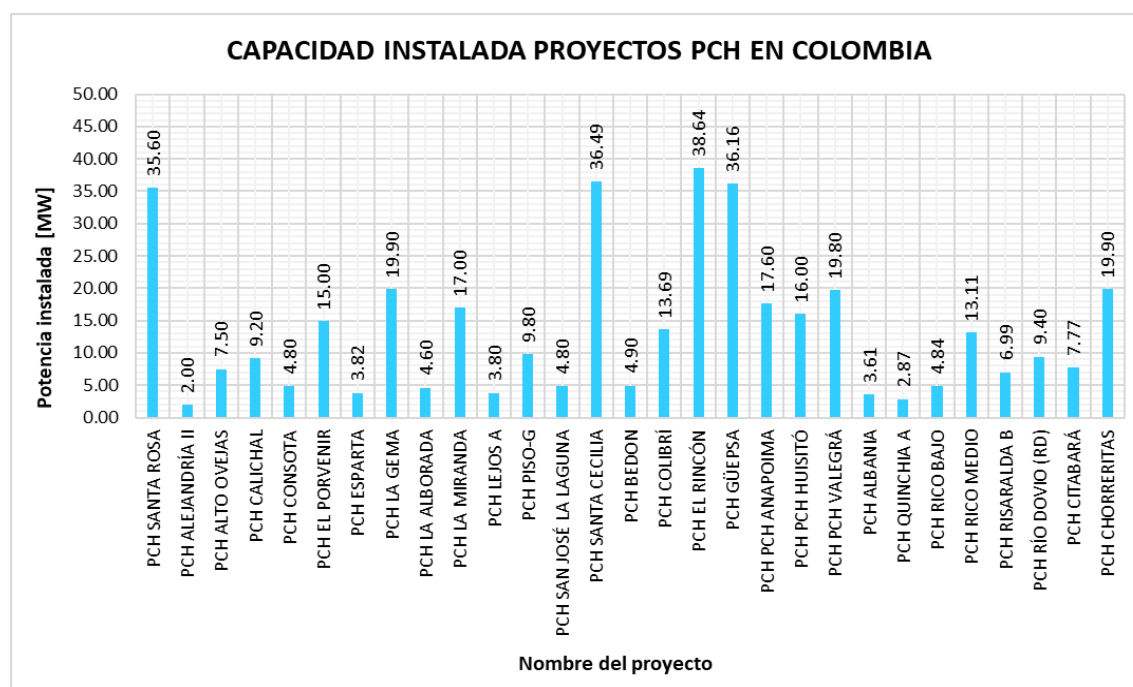


Figura 18. Capacidad instalada de proyectos PCH en Colombia (2022). Fuente: Elaboración propia

El país según (UPME, 2022) y según el sistema de información eléctrico colombiano (SIEL, 2022), tiene 509 proyectos hidroeléctricos aprobados, de los cuales registrados vigentes en diferentes fases, para el 2022 hay 214, 141 corresponden a PCHs con capacidad entre 1 - 50 MW; dichos proyectos tienen un rango de potencia entre 0.8 y 2400 MW y se encuentran clasificados y ordenados por potencia y regulación de caudal. De las 141 PCHs vigentes, 137 son a filo de agua y 4 de embalse, de los 509 proyectos hidráulicos 474 son a filo de agua y 35 de embalse. Esta

información se puede ver detalladamente en el archivo de excel: Hoja 10. La Figura 19 muestra la suma de capacidad por tecnología para los proyectos vigentes en el país.

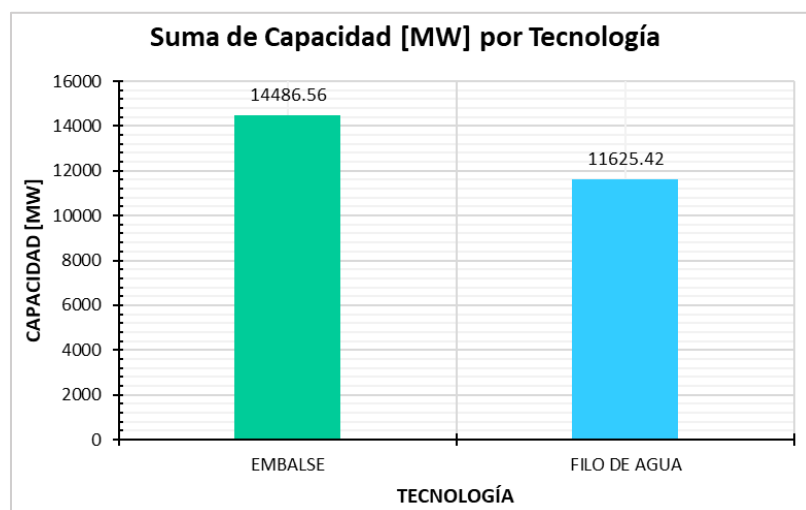


Figura 19. Suma de capacidad de proyectos hidráulicos vigentes en Colombia 2022 - Clasificación por regulación de caudal.
Fuente: Elaboración propia

La Figura 20 muestra la capacidad de cada una de las unidades hidráulicas del Sistema Interconectado Nacional, clasificadas por agente operador. En el archivo de excel, hoja 2 se encuentra la base de datos detallada con las respectivas potencias netas en MW para cada una de las unidades hidráulicas, el respectivo agente operador, su factor de potencia y la fecha de entrada en operación.

La base de datos que contiene toda la información de las pequeñas centrales hidráulicas en Colombia se encuentra organizada en un archivo de Microsoft office Excel llamado DATOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS, el cual contiene información de nombres, clasificación, departamento, municipio, empresa, capacidad, año de entrada, participación en el mercado, entre otros.

El mapa de la UPME que muestra los puntos de los principales proyectos vigentes en Colombia para el 2022 se puede ver en el ANEXO B.

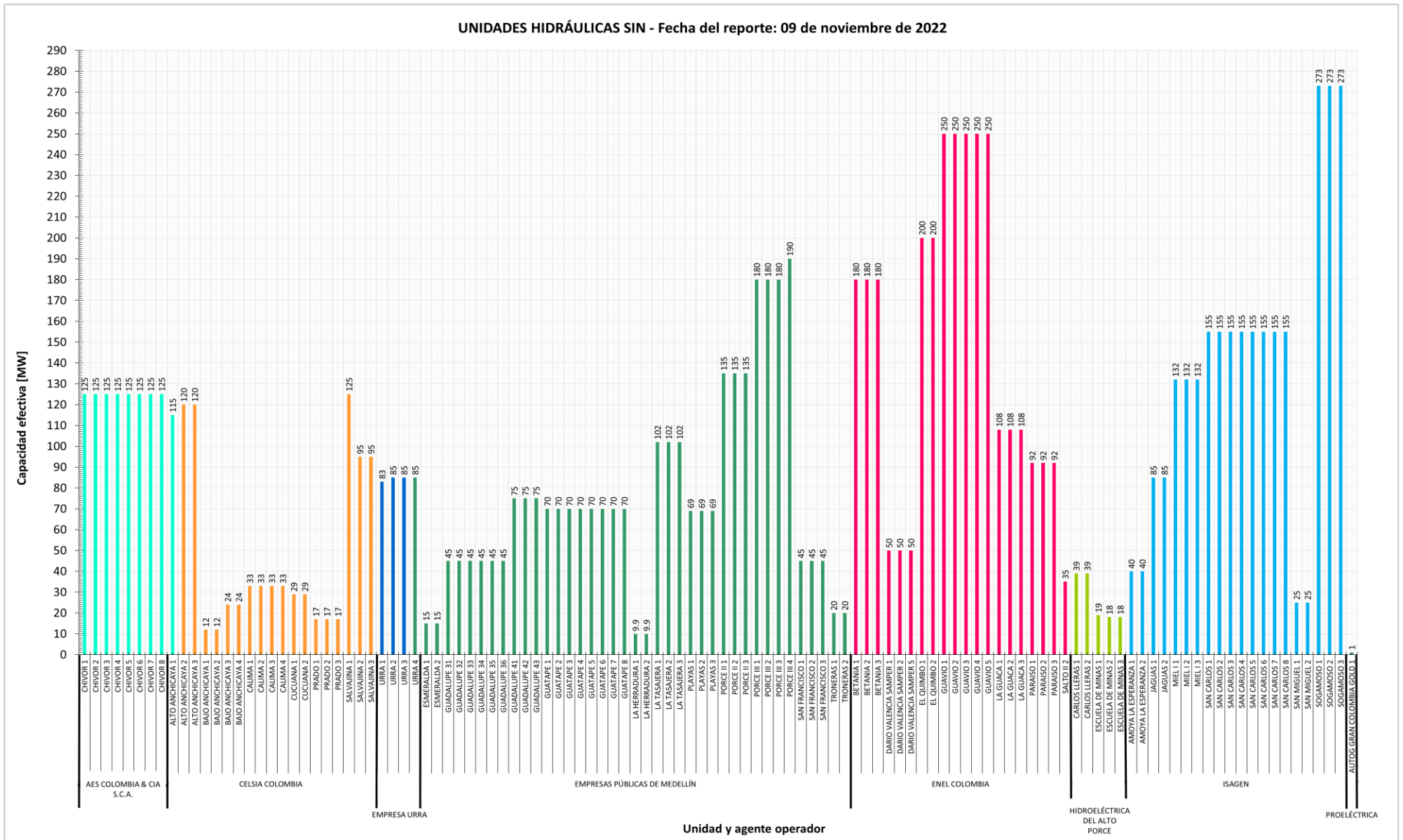


Figura 20. Capacidad Unidades hidráulicas del Sistema Interconectado Nacional. Fuente: Elaboración propia

5.5.3. *Potencia instalada (Antioquia)*

El departamento de Antioquia, ubicado al noroeste de Colombia, está situado en su mayor parte en la cordillera de los Andes y por ello con suelos fértiles, se ha potenciado como una región con vocación predominantemente agrícola, lo que ha permitido que tradicionalmente los habitantes hayan sostenido estrechas relaciones con sus territorios y sus aguas. Antioquia, un territorio rico en aguas, lo convierte en una región con características atractivas a todos los inversionistas para instalar Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH); es por eso por lo que actualmente hay muchas solicitudes de licenciamiento ambiental en la autoridad ambiental CORNARE. Antioquia cuenta con 56 centrales hidroeléctricas operativas con una capacidad de 4440 MW, de los cuales 4057 MW son generados en centrales hidroeléctricas, 389 MW en pequeñas centrales y 2.91 MW en minicentrales. La capacidad total instalada en Antioquia corresponde al 30.8% de la capacidad de generación de energía eléctrica total instalada en el país, sin tener en cuenta el megaproyecto hidroeléctrico Hidroituango, que contará con una capacidad de 2400 MW (Velásquez, 2019).

En la Figura 21 se observa para el departamento de Antioquia en 2019, la capacidad instalada de generación para las pequeñas centrales hidroeléctricas indicando el nombre de cada una de ellas y su capacidad. Con la finalidad de ilustrar el potencial hidroenergético que posee Antioquia los datos para todas las centrales hidroeléctricas incluida su ubicación, fecha de puesta en funcionamiento, capacidad hidroenergética y empresa reguladora se pueden ver en la Tabla A.4 del ANEXO A y archivo de excel página 17, las cuales están ordenadas de mayor a menor potencia y las resaltadas en color verde corresponden a las pequeñas centrales hidroeléctricas; para dicha clasificación de las centrales según su capacidad de generación se usó la información recopilada del Ministerio de Minas y Energía y de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) (Velásquez, 2019).

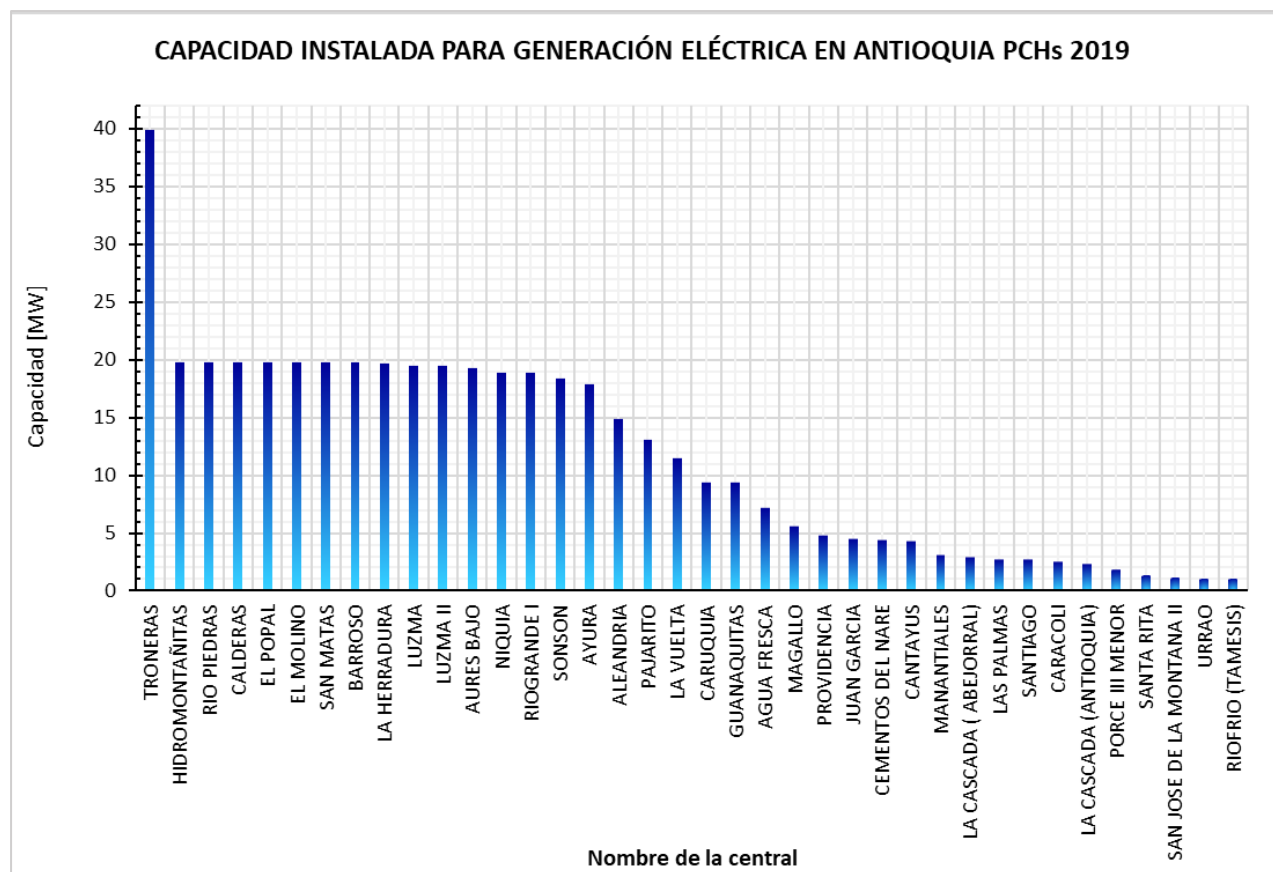


Figura 21. Capacidad instalada para generación eléctrica en Antioquia PCHs 2019. Fuente: Elaboración propia

Se estima que para el año 2017 entraron 180 MW de recursos menores, la mayoría de estas plantas son pequeñas centrales hidroeléctricas en Antioquia (64%) (XM, 2022).

Según la base de datos de la UPME, para Antioquia hay registrados 79 proyectos vigentes, de los 47 corresponden a pequeñas centrales hidroeléctricas, 46 a filo de agua y 1 de embalse (UPME, 2022). Estos 79 proyectos, sus capacidades, clasificación por regulación de caudal y municipio se encuentran organizados en la Tabla A5 del ANEXO A y en el archivo de excel página 13.

La Tabla 5 muestra los 13 principales proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas en Antioquia vigentes al año 2022 que completan un total de 227.06 MW de potencia acumulada, la Figura 22 muestra la ubicación de estos proyectos (UPME, 2022)

Tabla 5. Principales proyectos de PCHs en Antioquia 2022

UBICACIÓN (Antioquia)	Nombre Proyecto	Estado	Suma de Capacidad MW
Alejaandría	PCH ALEJANDRÍA II	Fase 1	2.00
Dabeiba	PCH LA ALBORADA	Fase 1	4.60
Dabeiba	PCH CALICHAL	Fase 1	9.20
Dabeiba	PCH LA GEMA	Fase 1	19.90
San Carlos	PCH LA MIRANDA	Fase 1	17.00
Granada	PCH COLIBRÍ	Fase 1	13.69
Puerto Berrio	PROYECTO HIDROELÉCTRICO CALAMAR (PCH)	Fase 1	4.60
Yolombó	PROYECTO HIDROELÉCTRICO CAMILO C. RESTREPO (PCH)	Fase 1	19.90
Puerto Berrio	PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA FLORESTA (PCH)	Fase 1	7.14
Tarso	PROYECTO DE ENERGÍA RENOVABLE MULATOS I (PCH)	Fase 2	9.23
Frontino	PROYECTO HIDROELECTRICO RIO VERDE (PCH)	Fase 2	9.90
San Andrés	PCH CHORRERITAS	Fase 3	19.90

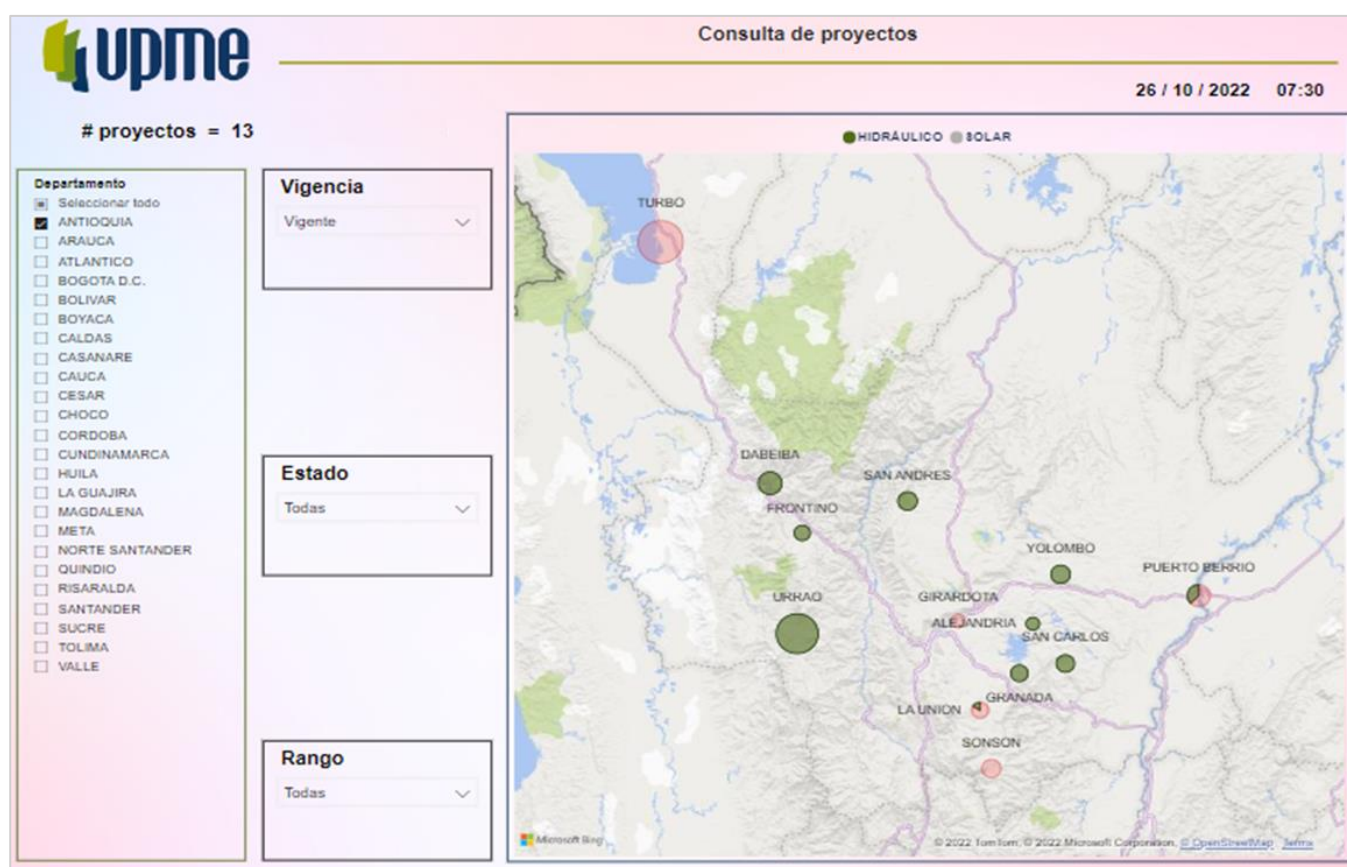


Figura 22. principales proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas en Antioquia vigentes al año 2022. Fuente: UPME, 2022

Es importante destacar que de estos 13 proyectos principales en Antioquia, 5 de ellos son los más importantes, la Tabla 6 muestra la ubicación, nombre de la central, potencia, estado y el año de entrada en operación (SIEL, 2022). Por otro lado, la Figura 23 muestra los sitios identificados para construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia y se encuentra resaltado en verde el mapa de Antioquia con lo cual se puede ilustrar mejor los puntos identificados

Finalmente, a partir de los datos en (Londoño, 2017) se observa en la Tabla 7, los totales para el potencial hidroenergético del departamento para todo tipo de centrales y aparte para las pequeñas centrales hidroeléctricas; de esta investigación es posible encontrar resultados significativos y con gran relevancia a la hora de implementarlos, ya que en caso de que se utilice todo el potencial del departamento de Antioquia, se pueden llegar a crear 279705 empleos en la etapa de construcción de las centrales y 4735 en solo las PCH, adicionalmente 10170 empleos en la etapa de operación y al menos 214 respectivamente, mínimo durante veinte años. Los ingresos por transferencias para los municipios y corporaciones adicionales a lo que actualmente obtienen con la operación de estos proyectos, se estiman según los datos reportados de al menos 9.971.683.200 millones de pesos al año, teniendo en cuenta todas las centrales hidroeléctricas y alrededor de 165.301.200 millones de pesos al año provenientes de las PCH; y a esto se le sumaría 11.731.392 millones de pesos al año por el impuesto de Industria y Comercio de los cuales 194.472 pesos provienen de las PCH.

Los datos completos y detallados para cada municipio, su potencial energético en MW, costo de la energía por kWh, costo de las transferencias del sector eléctrico, empleos durante la construcción y operación y el costo al año de los impuestos de industria y comercio se encuentran en el ANEXO A, Tabla A6 y en la página 17 del archivo de excel.

5.6. Tipos de turbina utilizados en las centrales hidroeléctricas Colombianas

En el proceso de desarrollo de un proyecto hidroeléctrico es de vital importancia considerar la cantidad disponible del recurso hídrico con el fin de garantizar la producción de energía en cualquier período del año, considerando no solo los períodos húmedos, sino también las épocas de caudal mínimo; para ello, es necesario minimizar los efectos negativos que conlleva la disminución del recurso hídrico en las temporadas secas, se hace necesario entonces seleccionar sitios con altos rendimientos hídricos y cuencas con tamaños suficientes que garanticen la regulación y la permanencia del agua en la corriente, así se disminuyen los sobrecostos de instalación y las altas variaciones en los ingresos.

Si se conoce la carga neta y el caudal de diseño, se puede seleccionar el tipo de turbina que mejor se adapte para cada proyecto, debido a que cada tipo de turbina es más eficiente dentro de un determinado rango de trabajo, de la carga y el caudal de diseño (Sandoval, 2018). Las pequeñas centrales utilizan turbinas acopladas a generadores para producir la electricidad, estas se clasifican en dos grupos: las turbinas de acción o también conocidas como turbinas de impulso o de presión constante en este grupo las más comunes son la Pelton, Turgo y Michell-Banki, y las turbinas de reacción como la Francis y la Kaplan. (Sandoval, 2018)

- i. Turbinas de acción** Aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerlas girar, el agua es dirigida a sus alabes a través de inyectores. Operan bajo la acción de uno o varios chorros libres a alta velocidad; cada chorro, de un diámetro determinado, se acelera hasta obtener el máximo de velocidad mediante una tobera externa al rodete de la turbina. La incidencia del chorro impacta en el álabe, comunicándole una velocidad periférica y le imparte al rotor un movimiento giratorio alrededor del eje de la turbina (García, 2011), el sentido del giro del rodete coincide en el punto en el que se produce el choque del agua sobre los álabes y así toda la energía cinética con la que llega el agua a la turbina al ser dirigida al rodete directamente, es utilizada para su giro y se convierte totalmente en energía cinética (Sandoval, 2018). En las turbinas de acción, la presión permanece constante en todo el rodete (presión atmosférica), por lo tanto la altura de presión absorbida por el rodete es nula; y, en consecuencia, el grado de reacción de estas turbinas debe ser igual a cero (García, 2011).
- ii. Turbinas de reacción:** Este tipo de turbinas son de admisión total, es decir, el fluido entra al rodete por toda la periferia, a diferencia de lo que ocurre con las turbinas de acción; el chorro de agua llega a los alabes a una presión superior a la atmosférica y con una velocidad alta, al ingresar el fluido lleva una alta energía potencial y cinética, transformándose en energía mecánica. Están constituidas por la tubería forzada, la cámara espiral, el distribuidor, el rodete y el tubo de aspiración o descarga. En las turbinas de reacción, la presión a la entrada del rodete es mayor que la presión a la salida del mismo, por tanto la altura de presión es diferente de

cero. El grado de reacción de estas máquinas se halla comprendido entre cero y uno. Asimismo, no se debe olvidar mencionar que en ningún instante el rodete se encuentra lleno de fluido; la presión atmosférica rodea siempre al rotor y al álabe, por tanto, la aceleración máxima del flujo se produce en la tobera y no en los álabes (García, 2011).

La selección de la turbina adecuada no solo depende de la potencia eléctrica demandada sino como se mencionó, se debe tener en cuenta también la altura y el caudal disponibles. La Figura 24 muestra una carta con las áreas de uso óptimo de las turbinas; debido a que tanto el diseño como la elección de las turbinas es especializado y único, únicamente se presenta cierta información básica indispensable para la selección de las turbinas en una central hidroeléctrica. Los parámetros que intervienen son: la caída bruta o neta, el caudal, indicadores energéticos de las turbinas y la posibilidad de que estas trabajen con mejores coeficientes de rendimiento. De acuerdo con (Sandoval, 2018), en una primera instancia se puede establecer el tipo de turbina a partir de la carga y el coeficiente de rendimiento que se espera para la turbina; la Figura 24 permite establecer el tipo de turbina con base en los parámetros mencionados. Por otro lado, en la Figura 25 se observa un ábaco en el que, mediante el caudal y la carga disponible, se encuentra el tipo de turbina y la potencia del equipo. Para su aplicación se debe tomar en cuenta el número de unidades que se requeriría para la central. Es importante señalar que este ábaco se tiene una pequeña área en blanco, ubicada desde la esquina inferior izquierda, esta área también corresponde a las turbinas Michell Banky.

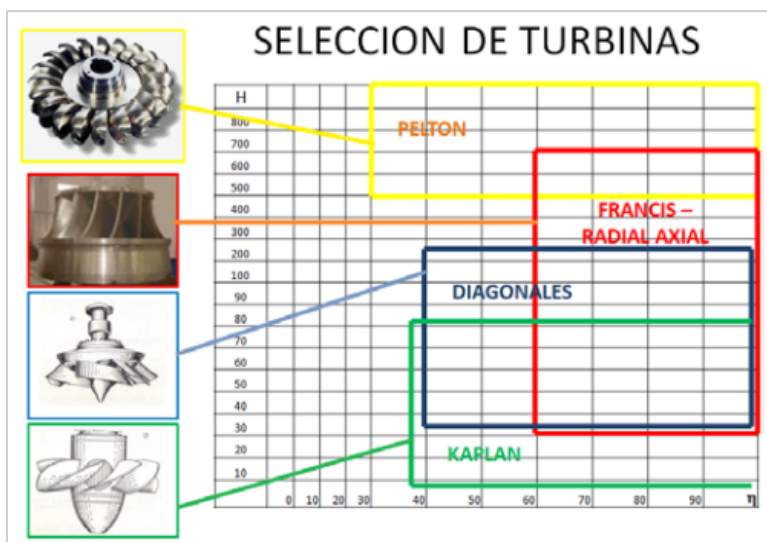


Figura 24. Tabla de selección para diferentes tipos de turbina. Fuente: Sandoval, 2018

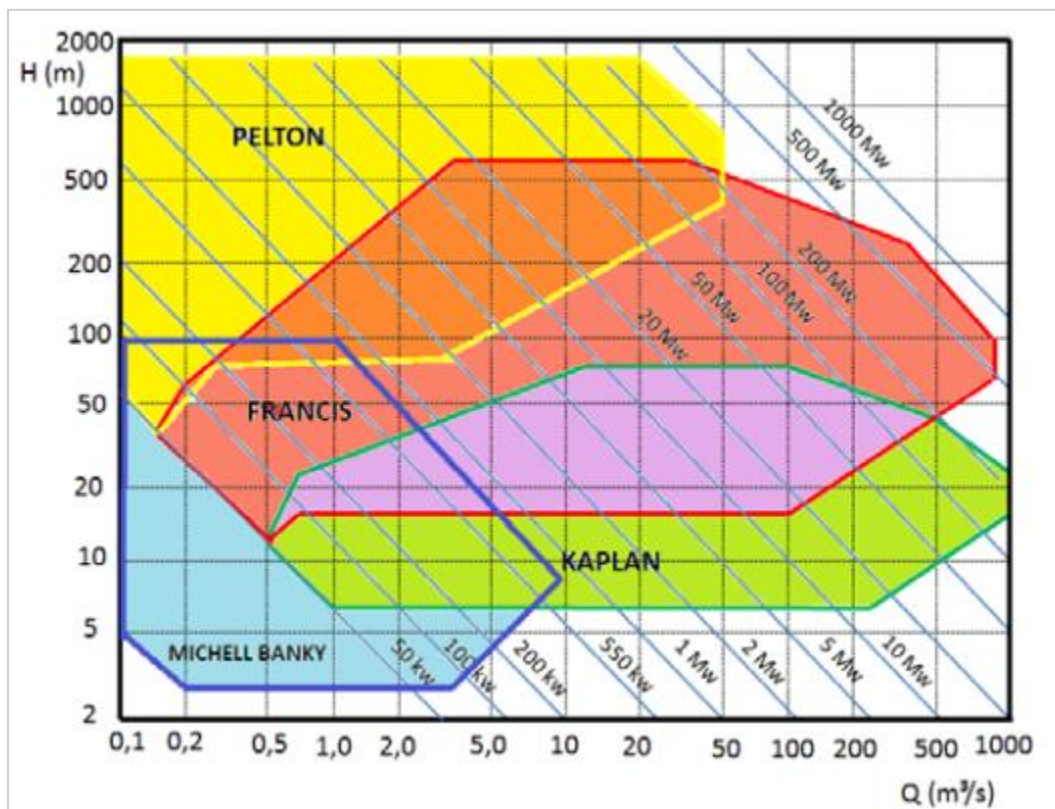


Figura 25. Tabla de selección de turbinas hidráulicas. Fuente: Sandoval, 2018

Algunas de las turbinas más utilizadas se describen a continuación:

- **Turbina Pelton:** Es el modelo más antiguo de turbina y una de las más utilizada en centrales hidroeléctricas. Estas turbinas se utilizan generalmente para sitios con saltos superiores a 300 metros. La turbina Pelton tiene un diseño simple, un gran disco circular está montado en un eje giratorio conocido como rotor, montadas en este disco circular hay cuchillas en forma de copa conocidas como cucharas, éstas están espaciadas uniformemente alrededor de todo el rotor, y por lo general, los cangilones se disponen de dos en dos; adicionalmente, se disponen toberas en el rotor y sirven para introducir agua a la turbina. De estas toberas salen chorros de agua tangenciales a la rueda de la turbina, lo anterior hace que la turbina gire como consecuencia del impacto de los chorros de agua sobre sus cucharas (BrightHub Engineering, 2015), (Cobb, 2012). Para aplicaciones en micro hidro energía puede ser usada para saltos menores a 150 m. La Figura 26 ilustra una turbina Pelton.

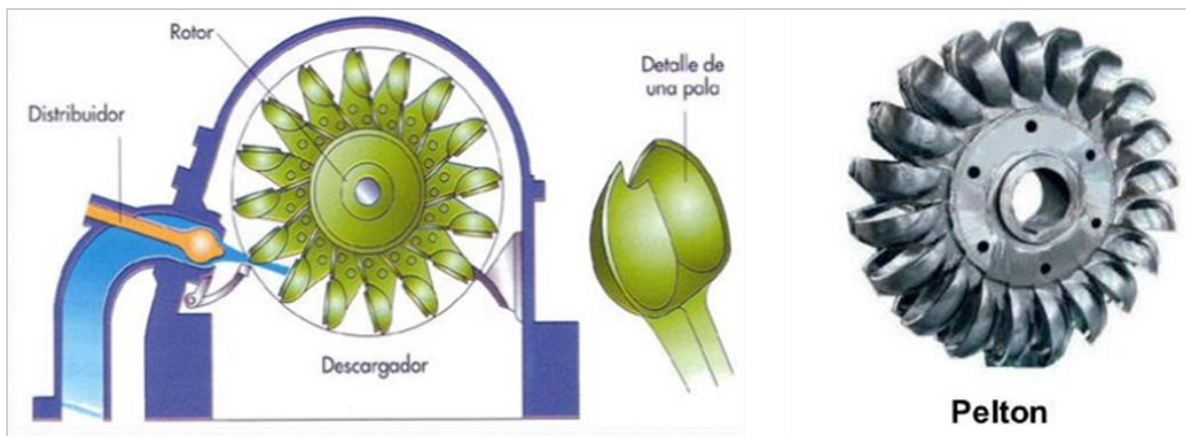


Figura 26. Turbina Pelton. Fuente: Elaboración a partir de Memberstripod & Cunill.

- **Turbina Turgo:** Fue desarrollada por la compañía Gilkes Energy en el año 1919. Es una turbina de chorro libre y de acción (grado de reacción = 0). La totalidad de la energía potencial será convertida en energía cinética antes de entrar al rodete (el cambio de energía estática al interior del rodete es nulo). Su campo de aplicación se encuentra entre las turbinas Francis y Pelton y sus principales componentes son el rodete y el inyector, muy similar a la turbina Pelton salvo por la forma de sus álabes (la mitad de los álabes Pelton). El chorro incide en los álabes (generalmente con un ángulo de 20° respecto al plano diametral del rodete), entrando por un lado del disco diametral y saliendo por el otro (este ángulo permite la salida del agua lo más eficiente posible). A diferencia de la Pelton, el diseño de una turbina Turgo permite que el chorro de agua impacte en varias cucharas simultáneamente (Irazusta, 2018). La Figura 27 ilustra una turbina Turgo.

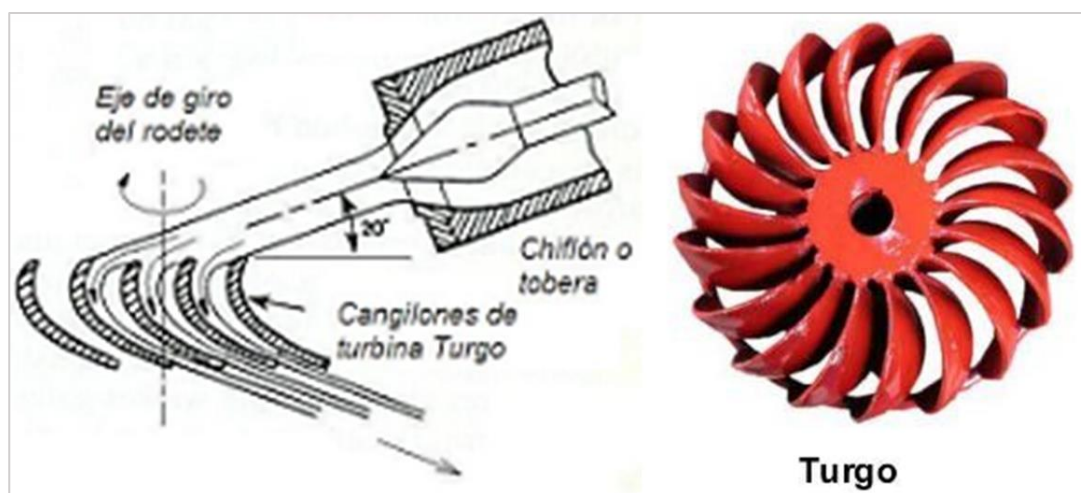


Figura 27. Turbina Turgo. Fuente: J. Cunill

- **Michell-Banki:** Las turbinas Michell-Banki, también conocidas como turbinas de flujo cruzado, son máquinas hidráulicas utilizadas para la producción y generación de energía en proyectos hidroeléctricos a pequeña escala. Desde su creación, la turbina de Michell-Banki ha sido objeto de múltiples investigaciones enfocadas a mejorar la eficiencia a fin de obtener el máximo aprovechamiento del recurso hidráulico disponible.

Este tipo de turbinas funciona bajo el principio de transformación de la energía potencial (cabeza de altura), en energía cinética justo antes de que el fluido ingrese al rodete, el cual opera a presión atmosférica. El agua es transportada por la tubería de conducción desde la captación hasta la casa de máquinas donde llega al inyector; el inyector debido a su forma acelera el fluido y lo dirige hacia el rodete, donde toca una determinada cantidad de álabes. El inyector orienta el fluido para que este haga contacto con los álabes en admisión orientado un ángulo llamado ángulo de ataque; al ingresar al rodete, el fluido entra en contacto con un primer grupo de álabes y entrega cerca del 70 % de la energía que contiene, posteriormente el fluido abandona esta primera etapa de aprovechamiento de energía y atraviesa el interior del rodete para hacer contacto nuevamente con un segundo grupo de álabes a los cuales entrega el restante 30 % de energía contenida. Finalmente, el fluido abandona el rodete y se libera nuevamente al afluente hídrico del cual fue tomado aguas arriba (Romero, Velásquez, & Chica, 2021). La Figura 28 ilustra una turbina Michell-Banki.

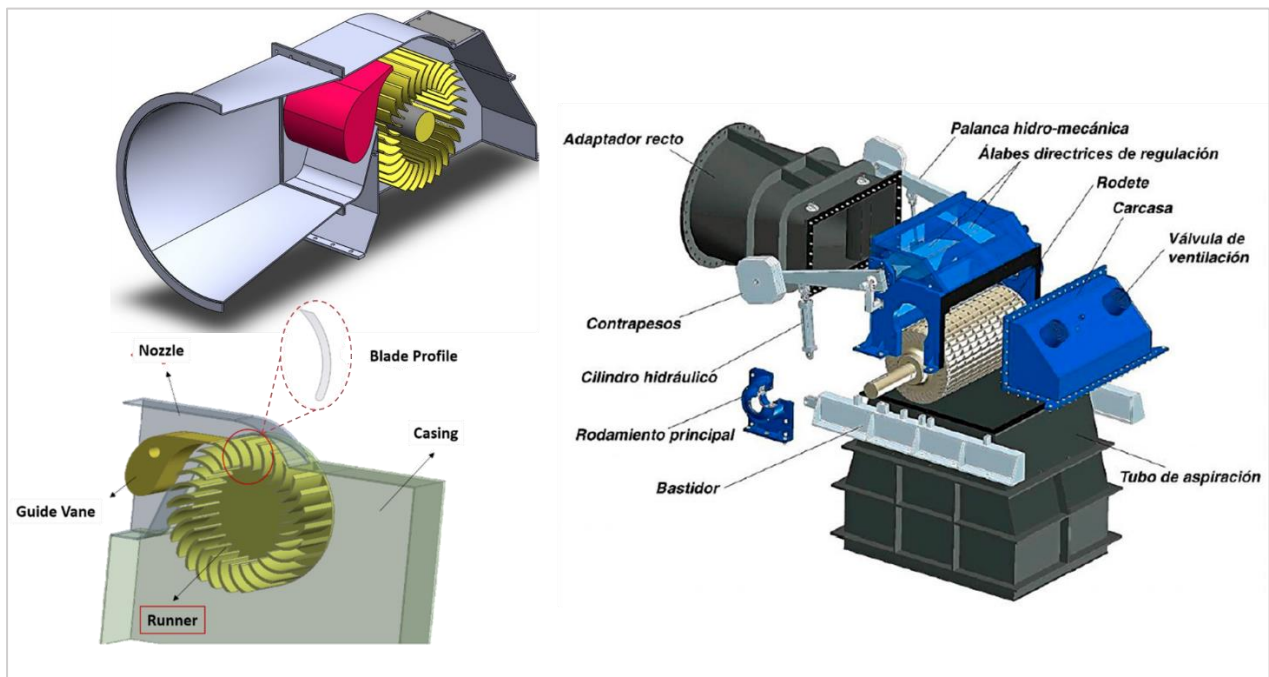


Figura 28. Turbina Michell-Banki. Fuente: Elaboración propia a partir de García, 2011 & Romero, Velásquez, & Chica, 2021

- **Turbina Kaplan:** Sigue el principio de las hélices de un barco. La turbina Kaplan es una turbina de tipo axial en la que el caudal de agua hace que los álabes de la hélice giren hacia adentro y hacia afuera en dirección axial con respecto al eje de rotación de la hélice. Gracias a la posibilidad de ajustar el ángulo de incidencia de las palas, tiene la ventaja de proporcionar un excelente rendimiento con pequeños saltos, pero también con grandes variaciones en el caudal (desde 200 metros cúbicos por segundo para subir) (Enel, s.f). La Figura 29 ilustra una turbina Kaplan.

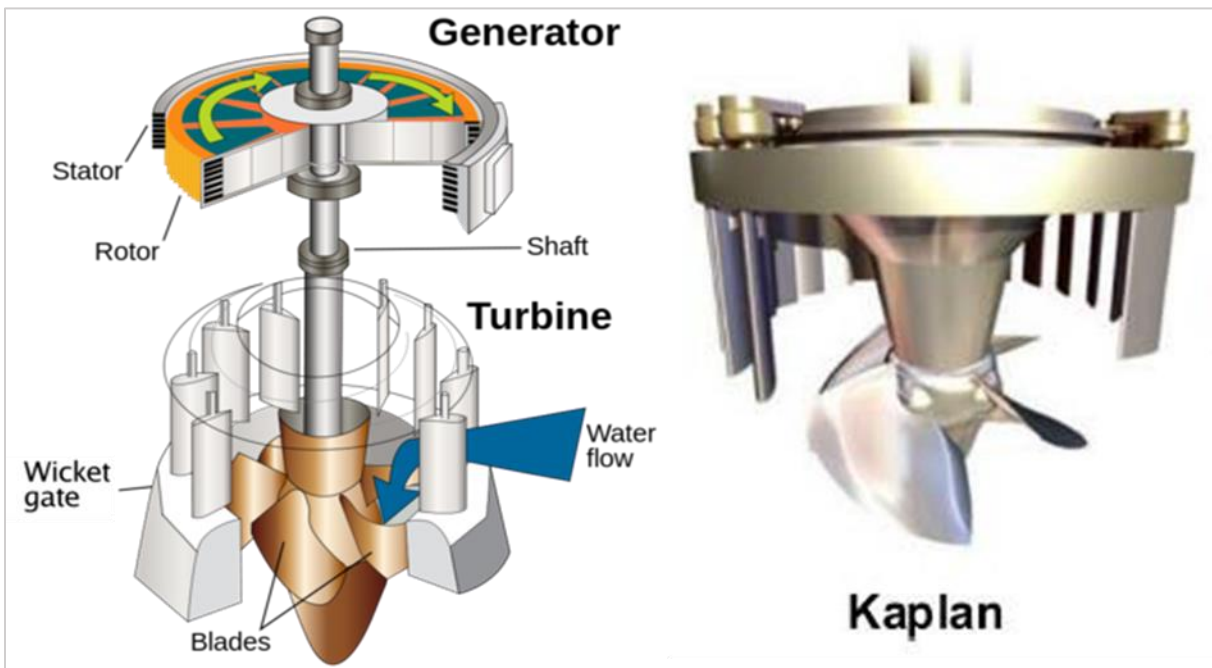


Figura 29. Turbina Kaplan. Fuente: J. Cunill & Lava

- **Turbina Francis:** Es el tipo de turbina hidráulica más utilizado. Es una turbina de flujo centrípeto en la que el agua llega al rotor a través de un conducto en espiral; después, un rodillo en la parte fija dirige el caudal para invertir las palas del rotor. Se utiliza para saltos de altura media (de 10 a 300-400 metros) y caudales de agua de 2 a 100 metros cúbicos por segundo; al tener una aplicación en general para saltos intermedios, son las más frecuentemente empleadas en instalaciones de pequeñas centrales, porque son capaces de aprovechar la energía estática del agua utilizando el caudal con un 90% de eficiencia (Enel, s.f). Se dice que es la turbina más eficiente elaborada hasta la fecha. La Figura 30 ilustra una turbina Francis.

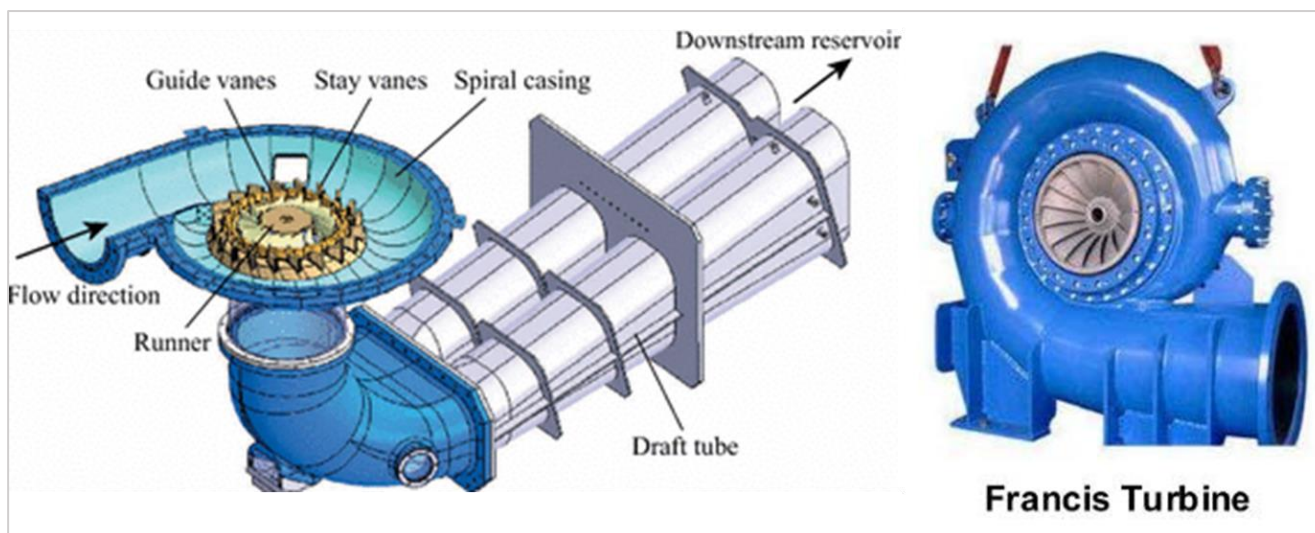


Figura 30. Turbina Francis. Fuente: J. Cunill

Reconociendo entonces los tipos de turbina, (Londoño, 2017) y (Rico, 2018) y otras diferentes fuentes bibliográficas, reportan que en Colombia las turbinas más utilizadas en la implementación son la Francis y la Pelton especialmente para las pequeñas centrales hidroeléctricas, considerando que, estas aprovechan mucho mejor la cabeza hidráulica de agua. El 31.61% de las centrales utilizan turbinas Francis y el 27.98% las turbinas Pelton (Mosquera, 2018). La Tabla 8 muestra los tipos de turbinas utilizados en pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia, el total de ellas y su potencia instalada.

Tabla 8. Tipos de turbinas utilizadas en PCHs colombianas

Tipo de turbina	Total de PCHs	Potencia instalada [kW]
Francis	61	69008
Pelton	54	58435
Turgo	9	13506
Michell-Banki	7	245
Otras	3	1383
Sin información	59	25940

De acuerdo con el plan de expansión de referencia 2009-2023, publicado por la UPME, se tiene planeado instalar 85.3 MW generados a partir de PCHs que entrarían a operar antes del 2013 (UPME, 2009). Los datos se muestran en la Tabla 9; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se indica el tipo de turbina y la capacidad.

Tabla 9. Proyecciones de expansión de PCHs en Colombia

Nombre	Capacidad [MW]	Tipo de turbina
Amaimé	19.9	Francis
Coello 1,2,3	3.7	Kaplan
Caruquia	9.5	Francis
Guaquitas	9.5	Francis
Barroso	19.9	Pelton
Neusa	2.9	--
El popal	19.9	Francis

Para el año 2020 según (Londoño, 2017) y (Sierra, Sierra, & Guerrero, 2011) la relación con el tipo de turbina utilizada en las PCH del país se muestra en la Figura 31; sin embargo, los nuevos proyectos vigentes y en desarrollo pueden tener otros diferentes tipos de turbinas para instalar, pero hace falta una investigación más exhaustiva para recopilar la información y poder clasificarla.

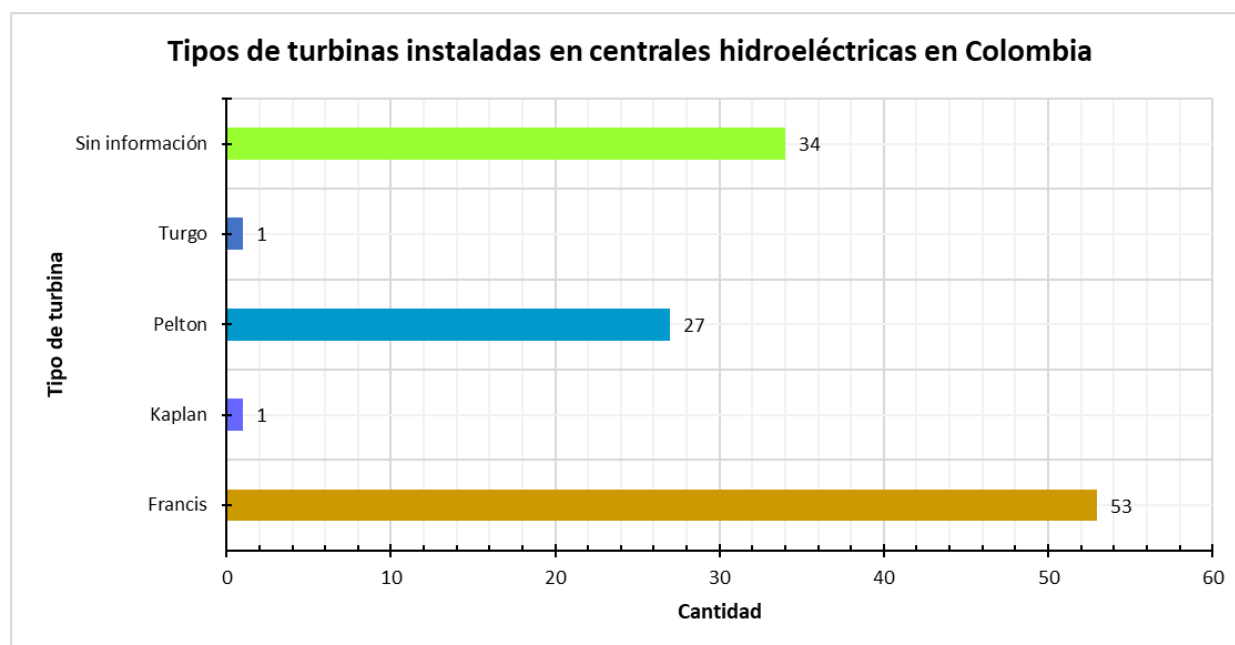


Figura 31. Tipos de turbinas y cantidad instaladas en PCH de Colombia. Fuente: Elaboración propia

Las turbinas tipo Michell-Banki son utilizadas principalmente en pico, mini y microcentrales hidroeléctricas, los proyectos hidroeléctricos que han recurrido a este tipo de turbina han sido 22 desde 1958 al 2005 completando una capacidad de 1.5 MW aproximadamente. Los proyectos, su ubicación, capacidad y año de entrada en operación se pueden ver en la Tabla A7 del ANEXO A.

6. Discusión

En este trabajo fue posible identificar el progreso de las centrales hidroeléctricas y su aporte a la matriz energética en el país, y se corrobora con los datos encontrados que la hidroenergía es y seguirá siendo por un buen tiempo, un pilar de desarrollo para Colombia no solo en cuanto a la generación de electricidad. Adicionalmente, las diferentes fuentes y autores consultados permitieron determinar la intervención activa de las PCH y su participación en la generación actual de las zonas en el sistema interconectado nacional y la posibilidad de progreso y mejora en las zonas no interconectadas (ZNI), lo anterior, da lugar a que sea factible la proyección que tiene Colombia para llegar a las ZNI gracias a los proyectos vigentes y aprobados para los siguientes años y las diferentes propuestas a nivel tanto departamental como nacional, debido al aprovechamiento de la riqueza hídrica que se tiene.

Si bien la hidroelectricidad es energía renovable, asegurar que es sostenible requiere de una discusión más amplia., no obstante, los resultados de este trabajo permiten ver que contribuye de manera significativa a proveer un servicio energético moderno y asequible que va más allá de la conexión física del servicio y su disponibilidad. La clasificación hecha de acuerdo a las capacidades, año de entrada y demás, permite estimar que las centrales que se encuentran actualmente activas y se han mantenido a través del tiempo son una opción confiable y abre las puertas a enriquecer y ampliar la visión de los ingenieros a crear nuevas estrategias que potencien la eficiencia energética en los trabajos asociados con generación de electricidad a partir de FNCER.

La clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas y los tipos de turbinas más utilizados en Colombia tuvo un trabajo amplio de investigación, pero, aunque algunos autores y bases de datos de la UPME y XM proporcionan información, no se encontró de manera detallada o muy amplia, debido a que la mayoría de los proyectos manejan privacidad en la información. Para realizar la investigación, a partir de los datos hallados se realizó una clasificación, con los cuales se pudo generar los gráficos y Tablas y así determinar de manera muy general la tendencia de los tipos de turbinas más utilizados en el país. Es necesario un periodo más prolongado para investigar de forma más exhaustiva y encontrar esta información de forma más precisa.

Finalmente, no es posible mirar estos proyectos sin tener en cuenta que a pesar de los beneficios y ventajas que traen consigo, la eficiencia energética, también está asociada a estos proyectos obligatoriamente con los espacios donde las comunidades están estrechamente involucradas, y de 509 proyectos vigentes registrados en la UPME pensar en estrategias sociales asociadas se hace necesario. La implementación de centrales hidroeléctricas, sin importar el tamaño, puede traer pérdidas a nivel territorial y social, y es importante considerar liderar estrategias de comunicación para hacer posible el hallazgo de puntos de equilibrio en la negociación que favorezca a la población aledaña al proyecto, en especial en cuanto al desplazamiento del asentamiento de las comunidades como ha ocurrido en algunas centrales que se encuentran en funcionamiento actualmente; aunque los proyectos a menor escala entre los que se encuentran las PCH no han generado este tipo de problemas, es importante recordar que las barreras sociales pueden representar un riesgo en la puesta en marcha de estas. Referente a los impactos económicos, este trabajo permite prever que bajo este panorama, se podrán ver beneficios como generación de empleos, ingresos adicionales, posibilidad de acceso a servicios públicos básicos y con ello mejoras en la calidad de vida, etc.

La hidroelectricidad entonces es fundamental para proveer seguridad y estabilidad a los sistemas eléctricos. Además de permitir mayor autonomía energética al proveerse de manera local, aumenta considerablemente la participación de energías renovables en la matriz energética colombiana ya que contribuye con el 70% respecto a las otras tecnologías; Así pues, aprovechar parte de su potencial se hace indispensable y respalda las metas de eficiencia energética actuales y se convierten en un camino para futuras mejoras que le permitan al país y al mundo alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible y la disminución del impacto ambiental, teniendo en cuenta que dejar a un lado los aspectos negativos y no aprender de la experiencia de los problemas que trae la implementación de esta tecnología, contribuye a que las huellas que afectan el medio ambiente en la actualidad se hagan más grandes.

7. Conclusiones

- Para satisfacer la demanda actual de electricidad, es necesario producir considerablemente una cantidad de energía que no dependa del petróleo y sus derivados, las circunstancias económicas y geopolíticas asociadas con su distribución geográfica y su dominio, han generado en muchos países la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático que viene experimentando el mundo.
- El inevitable agotamiento de los recursos y el rápido avance del mundo, han ocasionado que en los últimos años se produzca un importante impulso para el desarrollo de generación de electricidad por medio de fuentes renovables de energía, Antioquia en vista de ello, conoce y aprovecha su potencial hídrico ya que en este momento las PCHs son sostenibles desde el punto de vista medioambiental y el conocimiento de este tipo de tecnología le brinda seguridad y confiabilidad a la matriz energética del departamento y al país mientras se mejoran los otros procesos.
- La realización de este proyecto permitió comprender mejor el avance de las pequeñas centrales hidroeléctricas de Colombia y Antioquia, con ello, se crea una base para futuros estudios de optimización e implementación de este tipo de centrales a nivel nacional e internacional, o proyecciones futuras ya sea desde el ámbito académico o de inversión, que mejoren la calidad de la energía y se consoliden mucho mejor como tecnologías viables y eficientes energéticamente.
- Las pequeñas centrales hidroeléctricas, contribuyen de manera importante a la estabilidad del sistema interconectado nacional y reducen la dependencia y los riesgos de la importación de energía, constituyendo la base fundamental para el desarrollo económico de la nación.

- Actualizar el inventario de las pequeñas centrales hidráulicas en Colombia y Antioquia, en general requiere un esfuerzo académico exhaustivo en cuanto a investigación, porque la información asociada al tema de este proyecto está condicionada a las bases de datos que las empresas del sector eléctrico permitan acceso.
- En la actualidad Antioquia aporta el 50 % de las PCH que se encuentran operando o en etapa de construcción en el país, el departamento es una de las regiones con mayor visión para aprovechar las condiciones ambientales y los incentivos entregados por parte del Estado.

8. Referencias

- ACOLGEN. (2021). *Implementación de Fuentes No Convencionales (FNCER) en el sector minero Colombiano*. Obtenido de <https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2021/02/FNCER-en-el-sector-minero-Colombia-1.pdf>
- APEMEC. (2020). *Beneficios de las pch*. Obtenido de <http://www.apemec.cl/beneficios-pchs/>
- Appa. (2018). *Renovables en el mundo y en Europa*. Obtenido de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/#:~:text=El%20crecimiento%20a%20nivel%20mundial,10%2C8%25%20del%20total.>
- BECO. (2022). *UPME: Demanda y Eficiencia*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx>
- bnamericas. (2021). *bnamericas*. Obtenido de Generación hidroeléctrica crece en Colombia pese a menor demanda: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/generacion-hidroelectrica-crece-en-colombia-pese-a-menor-demanda>
- BrightHub Engineering. (2015). *Pelton turbine*. Obtenido de <http://www.brighthubengineering.com/fluid-mechanics-hydraulics/26777-hydraulic-turbines-the-pelton-turbine/>
- Buitrago, P. (2022). *Asoingeniería*. Obtenido de <https://www.asoenergia.com/es/prensa/las-energias-limpias-no-superan-el-1-en-la-matriz-energetica-del-pais-asoenergia>
- Castillo, Y. (2015). Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico Colombiano. *Prospect*, 13, 39-51. Obtenido de https://www.elcolombiano.com/historico/en_recursos_hidricos_colombia_sigue_como_uno_de_los_paises_mas_ricos_del_mundo-LGEC_128773
- Catorce6. (2018). Mapa de Generación eléctrica de Colombia en los próximos años. *Revista ambiental - Catorce6*. Obtenido de <https://www.catorce6.com/investigacion/15650-asi-se-movera-el-mapa-de-generacion-electrica-de-colombia-en-los-proximos-anos>
- Cobb, B. (2012). *Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico hydro installations*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/BilawalAhmed/impulse-turgo-and-pelton-turbine-performance-characteristics-and-their-impact-on-pico-hydro-installations>
- DW. (2020). Hidroituango: revelan verdaderas fallas en diseño del proyecto energético más grande de Colombia. *DW online*. Obtenido de <https://www.dw.com/es/hidroituango-revelan-verdaderas-fallas-en-dise%C3%B1o-del-proyecto-energ%C3%A9tico-m%C3%A1s-grande-de-colombia/a-54871984>
- Ecomento. (2014). *What are the top countries for electric cars?* Obtenido de <https://ecomento.de/2014/12/26/what-are-the-top-countries-for-electric-cars/>
- Enel. (2022). *Energía verde: presente y futuro de la electricidad*. Obtenido de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables>
- Enel. (s.f). *Tipos de turbina hidroeléctrica: Francis, Pelton y Kaplan*. Obtenido de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/turbina-hidroelectrica>

- Etecé. (2022). *Generación Eléctrica*. Obtenido de <https://concepto.de/generacion-electrica/>
- europa, C. (2012). *EU Transport in Figures*. Obtenido de <http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/doc/2012/pocketbook2012.pdf>
- Figuerola, A. (2022). *ACTUALIDAD DEL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO Y VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO*. Obtenido de ACTUALIDAD DEL SECTOR ENERGÉTICO
- García, M. (2011). *TURBOMÁQUINAS - TURBINAS HIDRÁULICAS*. Obtenido de https://unac.edu.pe/images/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/2011/Noviembre/IF_GARCIA%20PEREZ_FIEE.pdf
- Gómez, A. (2018). *Electric Energy Systems: Analysis and operation*. Obtenido de https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=DS_3DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=electric+energy+what+is&ots=bSxBnF9Efq&sig=GeHSOw5JaSQuqta0O2-RPwpOul&redir_esc=y#v=onepage&q=electric%20energy%20what%20is&f=false
- Gómez., T. (2020). *Actualización del inventario de PCHs en Colombia en una*. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/577
- IDAE. (2006). *Minicentrales hidroeléctricas: Manuales de energías renovables*. Obtenido de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Minicentrales_hidroelectricas_125f6cd9.pdf
- IEA. (2019). *Estadísticas de energía*. París, Francia.
- Ingfocol. (2022). *HIDROENERGÍA*. Obtenido de UPME: https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p25-36.pdf
- Irazusta, B. (2018). *DISEÑO DE MICROTURBINA TURGO*. Obtenido de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/11366/Informe%20Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ISAGEN. (2017). *La Central Hidroeléctrica Río Amoyá a filo de Agua no causa daño al Medio Ambiente*. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=1TG_MWuMDSw&ab_channel=CorpulmundoCorporacionPulmondelMundo
- Londoño, I. (2017). *Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas en Antioquia*. Obtenido de <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/11732>
- Looney, B. (2021). *Statistical Review of World Energy*. Obtenido de <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- López, C. (2002). *La electricidad: El recorrido de la energía*. Obtenido de <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2019/05/recorrido-de-la-energia-la-electricidad.pdf>
- Machado, L. (2015). *ATLAS POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DE COLOMBIA*. Obtenido de UPME: https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p1-24.pdf
- Macías, A. (2022). *ESTUDIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*. Obtenido de UPME: https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Publicaciones/Generacion_electrica_bajo_escenarios_cambio_climatico.pdf

- Malagón, E. (2017). *BID - Energía para el futuro*. Obtenido de La hidroelectricidad, la mayor fuente de energía sostenible.: <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-hidroelectricidad-la-mayor-fuente-de-energia-sostenible-aqui-te-decimos-por-que/>
- MinEducación. (s.f). *Conceptos eléctricos básicos*. Obtenido de <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171578.pdf>
- Molina, F. (2017). *Formulación de funciones de costo de incertidumbre en pequeñas centrales hidroeléctricas dentro de una microgrid*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6007698>
- Mosquera, L. (2018). *Planta Micro-hidroeléctrica: ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTACIÓN DE TURBINA HIDRO-CINÉTICA EN ZONA NO INTERCONECTADA*. Obtenido de Planta Micro-hidroeléctrica
- Patarroyo, A. (2020). *PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (PCH'S)*.
- PEN. (2015). *PLAN ENERGÉTICO NACIONAL COLOMBIA IDEARIO ENERGÉTICO 2050*. Obtenido de UPME: http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen_idearioenergetico2050.pdf
- REN21. (2014). *Renewables 2014 Global Status Report*.
- Rico, G. (2018). *Hidroeléctricas en Colombia: entre el impacto ambiental y el desarrollo*. Obtenido de <https://es.mongabay.com/2018/06/hidroelectricas-colombia-hidroituango/>
- Romero, F., Velásquez, L., & Chica, E. (2021). Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 23-46. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/5537/553768365003/html/#redalyc_553768365003_ref9
- Sandoval, R. (2018). Capítulo 6: Conceptos básicos de centrales hidroeléctricas.
- SIEL. (2022). *Informe Dinámico de Registro de Proyectos de Generación de Energía Eléctrica*. Obtenido de <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generaci%C3%B3n/Inscripci%C3%B3ndeproyectosdeGeneraci%C3%B3n/tabitid/113/Default.aspx>
- Sierra, F., Sierra, A., & Guerrero, C. (2011). *Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica*. Obtenido de https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/22/27
- Soto, S. (2022). *Diversificar la matriz y cuidado del planeta, hacia una transición energética justa y sostenible*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/especiales/el-futuro-de-los-servicios-publicos/diversificar-la-matriz-y-cuidado-del-planeta-hacia-una-transicion-energetica-justa-y-sostenible-3447325>
- Táutica, C. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Obtenido de UPME: http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- Thales. (s.f). *Centrales hidroeléctricas*. Obtenido de <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo3f.html#2>
- TotalEnergies. (2021). *Tipos de energías*. Obtenido de <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/tipos-de-energias>
- Unidas, N. (2022). *¿Qué son las energías renovables?* Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>
- UPME. (2005). *Costos Indicativos de generación eléctrica en Colombia*.

-
- UPME. (2009). *Subdirección de Planeación Energética - Plan de expansión de referencia. Generación - Transmisión 2009-2023*.
- UPME. (2020). *UPME-HIDROENERGÍA*. Obtenido de Potencial Hidroenergético de Colombia: https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p25-36.pdf
- UPME. (2022). *Demanda y Energía*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia>
- UPME. (2022). *Informe de registro de proyectos de generación de electricidad*. Obtenido de <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODRjNWY2NmEtZDI5MC00OGJhLWVmMTItYmU3NTNiMDE4MTM2IiwidCI6IjUxYzFhOGQwLTM5YmQtNDZiYi05YmRlLTkxZTZiNGU3MDRmZCJ9>
- UPME. (2015). *ATLAS: Potencial Hidroenergético de Colombia. Bogotá*.
- Vargas, M. (2018). Hidroeléctricas, ¿energía amigable con el medio ambiente? *Pesquisa Javeriana*. Obtenido de <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/hidroelectricas-energia-amigable-con-el-medio-ambiente/>
- Velásquez, L. (2019). *Generación de energía hidráulica en Antioquia*. Universidad de Antioquia.
- Vivanco, E. (2020). *Energías renovables y no renovables: Ventajas y desventajas de ambos tipos de energías*. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29102/1/BCN_Energia_renovable_y_no_renovableventajas_y_desventajas_final.pdf
- WTW. (2020). *WTW (Willis Towers Watson)*. Obtenido de Proyectos de energía hidroeléctrica en Colombia: <https://www.wtwco.com/es-CO/Insights/2020/12/proyectos-de-energia-hidroelectrica-en-colombia>
- XM. (2015). *Informe de operación del SIN*. Obtenido de <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx>
- XM. (8 de Noviembre de 2022). *Hidrología SIN*. Obtenido de <https://www.xm.com.co/portal-de-indicadores>
- XM. (2022). La demanda acumulada del año con corte al 31 de mayo de 2022 refleja un crecimiento del 5.5% en comparación con el mismo periodo de 2021. *Noticias XM*. Obtenido de <https://www.xm.com.co/noticias/5000-la-demanda-acumulada-del-ano-con-corte-al-31-de-mayo-de-2022-refleja-un-crecimiento#:~:text=El%204%20de%20mayo%20de,mismo%20mes%20de%20a%C3%B1o%20anterior.>
- XM. (2022). *Parámetros técnicos: Capacidad efectiva por tipo de generación*. Obtenido de <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- XM. (2022). *Parámetros técnicos: Detalle hidráulicas*. Obtenido de <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=detallehidraulicas>
- YPF. (2022). *Los recursos naturales y sus transformaciones energéticas*. Obtenido de https://energiasdemipais.educ.ar/edmp_lecturas/fuentes-de-energia/