

ESPECIALIZACION EN ALTA GERENCIA

TRABAJO DE GRADO

PLANEACIÓN ESTRATÉGICA DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

JULIO CÉSAR GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

CÓDIGO: 4700253



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA

ESPECIALIZACIÓN EN ALTA GERENCIA

BOGOTÁ D.C.

2015

PLANEACIÓN ESTRATÉGICA DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Julio César González Hernández, Universidad Militar Nueva Granada

RESUMEN

Proyectar, construir y poner en marcha una pequeña central hidroeléctrica no es tarea fácil. Para hacerlo hay que tomar en consideración múltiples aspectos del problema, desde la elección del sitio adecuado hasta la explotación del aprovechamiento. Todo ello exige un amplio espectro de conocimientos sobre ingeniería, gerencia, financiación, y relaciones con la Administración. Esta planeación reúne todos esos conocimientos de forma que el inversor potencial pueda seguir paso a paso el camino que le conducirá al éxito final.

Para implementar la planeación estratégica de una pequeña central hidroeléctrica se hace necesario tener claridad en cuanto a los conceptos básicos tales como la definición de lo que es una pequeña central hidroeléctrica, la forma de explotar el recurso hidráulico y la forma en que está organizada la planeación, se describirán los pasos que hay que dar para evaluar el aprovechamiento y decidir si debe o no proceder a realizar un estudio de viabilidad.

La lectura de este trabajo de grado permitirá, al desarrollador potencial, entender y aprender que es lo que tiene que hacer, y que pasos tiene que dar para llegar a explotar un aprovechamiento de pequeña hidráulica.

PALABRAS CLAVES: Planeación estratégica, fuentes de energía, energías renovables, gerencia de proyectos, energía hidroeléctrica, recurso hídrico, evaluación de impacto ambiental, evaluación económica, procedimientos administrativos.

STRATEGIC PLANNING A SMALL HYDROPOWER PLANT

ABSTRACT

Design, build and launch a small hydroelectric power is no easy task. To do this you have to take into account multiple aspects of the problem, from choosing the right place to operation of harvesting. This requires a broad spectrum of knowledge engineering, management, financing, and relations with the administration. This planning has all this knowledge so that the potential investor to follow step by step the path that will lead to ultimate success.

To implement the strategic planning of a small hydroelectric power is necessary to have clarity as to the basics such as the definition of what a small hydroelectric plant, and how to exploit the water resource - and how the planning is organized, describing the steps that must be taken to evaluate the use and decide whether or not to proceed with a feasibility study.

Reading this degree work permit, the potential developer, understand and learn what to do, and what steps you need to take to get to operate a small hydraulic use.

JEL: A33, A3, A39, H54, L32, L74, L94, Q25, Q43, Y10, Y91

KEYWORDS: Strategic planning, energy sources, renewable energy, project management, hydropower, water resources, environmental impact assessment, economic evaluation, administrative procedures.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo denominado: PLANEACIÓN ESTRATÉGICA DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA, ha sido elaborado para permitir que las organizaciones estén en la búsqueda constante de la mejora de sus gestiones, dicha búsqueda ha sido el impulso del surgimiento de nuevos métodos, técnicas, herramientas y demás aspectos que a lo largo del tiempo han sido adoptados por diversas empresas debido a los resultados históricos evidenciados de su aplicación y las condiciones cambiantes del mercado hacen necesario delinear estrategias que permitan a la empresa, mantenerse vigente y seguir desarrollándose en un horizonte de tiempo, así se constituirá en un instrumento que permita el desarrollo integral de la empresa, para un mejor seguimiento deberá ser revisado anualmente.

El entorno más competitivo en este sector, debido a la globalización, al avance tecnológico y a la oferta de nuevas fuentes de energía, ocasionan cambios al interior de las empresas, para lo cual es de mucha utilidad que las organizaciones cuenten con un planeamiento estratégico que los guíe y proporcione pautas de acción en su camino de alcanzar la visión.

El sector eléctrico, que requiere significativos montos de inversión, cumple un rol importante en el desarrollo de la economía nacional, debido a que la energía es un insumo imprescindible para la operatividad de toda actividad económica, constituyendo un elemento determinante en la calidad de vida de la población.

Cabe destacar, que, para su preparación se ha tomado en consideración el mercado, el sector y la empresa, así como las fuerzas internas y externas a las cuales está expuesta, esta información y análisis constituirán el marco estratégico orientador del trabajo.

Las empresas tienen que ser competitivas, ya que los competidores también se siguen preparando. El presente trabajo de tesis recopila, analiza y evalúa información relevante del sector energético y toma como guía el Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo, empresa a la cual pertenezco, a fin de ver su potencial e identificar sus fortalezas y debilidades internas, las oportunidades y amenazas del entorno, y los factores claves de éxito del sector eléctrico; los cuales, en conjunto, nos permitirán definir las estrategias y los planes a seguir por el proyecto en los próximos años. El desarrollo de este plan estratégico utiliza como metodología la escuela del diseño.

Si no nos atrevemos a buscar el cambio, estaremos condenados a repetir los errores del pasado, por eso es que se requiere una visión de largo plazo para poder anticiparnos a los cambios y ser innovadores en nuestro tiempo.

REVISIÓN LITERARIA

La literatura para la planeación estratégica de una pequeña central hidroeléctrica (PCH) nos enfoca y nos guía para entender en sí qué es la energía y cómo se produce ésta a partir de flujos superficiales de agua. El agua es un recurso renovable cuyo aprovechamiento es considerado como un proceso limpio, eficiente, confiable y durable, que incurre en bajos costos de mantenimiento y operación. Además, presenta una larga vida útil y tiene un bajo impacto ambiental. (Hita & N.H.C, 1987)

El aprovechamiento de este tipo de energía se realiza mediante la utilización de centrales hidroeléctricas, por tanto este documento intenta aclarar y guiar más al lector en la parte de construcción, planeación estratégica, manejo financiero y administrativo haciéndonos entender que al canalizar el agua a un sector

determinado se pueden operar turbinas, que a su vez alimentan a equipos generadores para así obtener electricidad.

Existen centrales hidroeléctricas que aprovechan la energía cinética del agua, y centrales de embalse, que almacenan agua y cuya energía primaria es la potencial. Una central hidroeléctrica es considerada renovable no convencional en caso de que su potencia sea menor a 20 MW, denominada como pequeña hidráulica. (French, 1988).

En forma general la literatura para este tipo de temas es muy basta pues incluye temas tanto técnicos, ambientales, administrativos como también financieros, los cuales nos dan una idea más centrada a la hora de atrevernos a invertir en un proyecto como el de las centrales hidroeléctricas. Esta forma de generar energía es clasificada en la literatura técnica en 2 tipos: mini hidráulica y micro hidráulica, sin embargo, no existe un criterio homologado para su clasificación. Para efectos de este documento, entenderemos como mini o pequeñas centrales hidráulicas aquellas que están conectadas a la red eléctrica con potencia menor a 20 MW, y como micro centrales, a aquellos equipos que proveen energía en potencias menores a 300 KW y en sistemas aislados de la red eléctrica. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía , 2006), (Llamas, 1933), (ACOLGEN, Asociacion Colombiana de Generadores de Energia Electrica , 2010).

Actualmente las principales barreras a las que se ve enfrentada una central mini hidráulica están relacionadas con la disponibilidad, tramitación y perfeccionamiento de los derechos de agua y la ausencia de criterios unificados de evaluación de impacto ambiental para estas centrales. Por otra parte, el alto costo de las líneas de transmisión pueden convertir a una central mini hidráulica conectada a la red eléctrica, en un proyecto inviable. (Jacob, 2002), (EMGESA S.A E.S.P., 2008)

Teniendo en cuenta los elementos literarios enunciados anteriormente, se tienen herramientas suficientes para integrar aspectos técnicos, evaluaciones ambientales, financieros y administrativos para la realización de la planeación estratégica de una central hidroeléctrica y así ofrecer una comprensión más clara de cómo ejecutar estos proyectos en nuestro mercado colombiano.

METODOLOGÍA Y CONTENIDO

Este Trabajo de Grado expone una planeación estratégica de una PCH y la forma de explotar el recurso hídrico; describimos los pasos que hay que dar para evaluar el aprovechamiento y decidir si debe o no proceder a realizar un estudio de viabilidad. Este documento nos guiara y enfocara a lograr la eficiencia energética y la profundización de la participación de las fuentes de energía limpias, desde una perspectiva administrativa, gerencial y financiera y nos ayudará a identificar, valorar y optimizar los costos y beneficios de la inversión, el aumento de la productividad, el aumento de la competitividad, los impactos en la sostenibilidad y las proyecciones de crecer conjuntamente el negocio, con sus proveedores, clientes, comunidades y medio ambiente de interés.

Se aclara que el objeto de este documento no es adentrarnos profundamente en temas técnicos sino dar un sentido de orientación a la hora de hacer una planeación estratégica para la ejecución de una PCH.

Una PCH es una instalación donde se utiliza la energía hidráulica para generar cantidades de electricidad, por medio de uno o más grupos de conjuntos turbina/generador. (French, 1988).

El análisis de las posibilidades hidroeléctricas de las cuencas hidrográficas, parte del conocimiento de estudios de topografía, hidrología, geología y de suelos, ya que son la base para el diseño de todas las obras civiles necesarias, en la construcción de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's). (Llamas,

1933). El comportamiento hidrológico de la cuenca está en función de sus características de clima, cobertura vegetal, geomorfología y fisiografía de la misma. El estudio hidrológico incluye el análisis de las cuencas donde se localiza el proyecto, con el fin de determinar los caudales en el punto escogido como sitio de capacitación, tanto en valor medio, a escala mensual o diaria como en sus valores máximos y mínimos¹. Colombia ha sido clasificada, como el cuarto país en el mundo con capacidad hidráulica, con un caudal promedio multianual en los principales ríos de 52.075. m3/seg y un área total de 1.141.748 km². La energía con la que Colombia ilumina sus ciudades, pone a rodar sus sistemas de transporte, posibilita el funcionamiento de su industria y enciende los aparatos que se usan en los hogares, es una de las más competitivas del mundo. Así lo señala el estudio de Competitividad Global de Energía 2013, realizado por el Instituto Choiseul y Kpmg, que ubica al país en el puesto cinco entre 146 naciones; apenas después de territorios con menores dificultades geográficas y con economías más desarrolladas que Colombia, como Noruega, Canadá, Islandia y Dinamarca. (ACOLGEN, Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica, 2010)

La energía eléctrica colombiana, según el índice es de alta calidad, confiable y respetuosa con el medio ambiente. "Y precisamente, en lo que mejor sale calificado el país en este estudio es en la composición de su canasta energética. En esa variable Colombia ocupó el segundo lugar. La canasta nacional ha demostrado ser confiable, al combinar la generación hidroeléctrica con la termoeléctrica para abastecerse cuando hay veranos muy prolongados. Es una canasta muy segura"², señala el profesor Jorge Villada, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antioquia. La confiabilidad de las fuentes de electricidad en Colombia se apoya en gran medida en la generación hidroeléctrica, que representa el 63,7% de la capacidad instalada, y se incrementa a 68% si se suman las pequeñas microcentrales. La segunda fuente de generación es la termoelectricidad, que también tiene un peso importante en la canasta total, con un 31% --a gas (18,64%), a carbón (7,41%) y a combustibles líquidos (5,31%)-. El resto de la composición nacional del mercado se apoya en otras fuentes como la cogeneración, con una participación de 0,46%; y la eólica, que apenas suma 0,14%.

El desarrollo de la hidroelectricidad en Colombia no es gratuito. Se debe a que hay una riqueza natural en agua que se combina con una geografía montañosa. "Esa condición nos diferencia de otros países del mundo. Nuestra producción es muy limpia en términos ambientales. No tenemos unas emisiones muy altas. En general tenemos un buen potencial y un recurso que hemos venido aprovechando y que tiene un buen desarrollo"³. Lo anterior no quiere decir que el país deje de pensar en desarrollar de manera profunda otro tipo de energías.

En cuanto a hidroelectricidad en proyectos grandes, según el inventario de Interconexión Eléctrica S.A. – ISA- , se cuenta con un potencial de 93.085 MW resultado del inventario de 308 proyectos mayores de 100 MW, de esta potencialidad se han convertido 7.700 MW a capacidad instalada. Según el Plan Energético Nacional – Pen-, en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, se ha estimado un potencial global de 25.000 MW instalables, de los cuales según el inventario del Programa Nacional de Energías no Convencionales y de estudios adelantados por la Universidad Nacional de Colombia, se han construido 197 Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

El primer paso para realizar un proyecto hidroeléctrico es la **evaluación del terreno**, se debe tener claro que para generar hidroelectricidad se necesita un determinado caudal de agua y una altura de salto. La ubicación del emplazamiento requiere la disponibilidad de estos dos factores. Hoy en día se puede conocer, con aproximación suficiente, cual es el régimen de caudales previsibles en año hidráulico medio, en un tramo de río determinado, y estimar con precisión el salto bruto disponible. Con las herramientas de

¹ Erik Bollaert y Celso Penche (ESHA)

² Jorge Villada

³ Jorge Enrique Salazar Velásquez, subdirector de Mercados Energéticos de EPM

ingeniería hidráulica, se puede conocer, a partir del salto bruto, y en función de la opción tecnológica seleccionada, el valor del salto neto. Régimen de caudales previsible, salto bruto y neto, capacidad instalada y producción anual neta, pueden ser, por lo tanto, conocidos fácilmente.⁴

La elección de la solución tecnológica óptima es el resultado de un largo proceso iterativo en el que continuamente hay que ir comparando costos y beneficios. Esa opción vendrá condicionada en buena medida por la topografía del terreno. Por otra parte, la sensibilidad ambiental de la zona determinará la importancia del impacto y el costo de las medidas correctoras cuya influencia en el presupuesto está lejos de ser despreciable. El estudio previo del terreno podrá llevarse a cabo a partir de la cartografía existente, que, afortunadamente, en los países desarrollados está disponible a una escala cada vez más pequeña. Por otra parte la fotografía aérea, y los nuevos desarrollos cartográficos basados en el GPS, suministrarán datos suficientes para llevar a buen término un primer estudio geomorfológico que, habrá de ser completado por un minucioso trabajo de campo sobre el que fundamentar ese proyecto de aprovechamiento, con el que llevar a cabo el estudio definitivo de viabilidad. (Sinniger & Hager, 1989). Resumiendo, para llevar a cabo dichos estudios se requiere lo siguiente: topografía, cartografía, estudios geotécnicos, fotogeología, perforaciones, análisis de laboratorio, análisis geológico estructural y análisis de financiamiento.

Como segunda medida se requiere una **evaluación del recurso hídrico**, el aprovechamiento hidráulico necesita, para generar electricidad, un determinado caudal y un cierto desnivel. Este desnivel puede estar creado por una presa, o conduciendo el agua, derivada del curso de agua, por un canal más o menos paralelo a su curso, de muy poca pendiente con una pérdida de carga pequeña, hasta un punto desde el que es conducida a la o las turbinas por una tubería a presión, o tubería forzada. (Sinniger & Hager, 1989). La caída del agua genera una potencia la cual se utiliza principalmente para accionar la turbina generando energía eléctrica.

Como tercer paso para la ejecución de PCHs es conocer las **estructuras hidráulicas** que la conforman. Un pequeño aprovechamiento hidráulico incluye un número de estructuras, cuyo diseño viene condicionado por el tipo de esquema, las condiciones locales, el acceso a los materiales de construcción e incluso por las tradiciones arquitecturales del país o región. A continuación se indican las estructuras más corrientes en un aprovechamiento hidráulico, en este caso describiremos y expondremos las estructuras del **Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo** en el cual yo me desempeño como Ingeniero de Geología y Geotecnia.

Estructuras de derivación: Presa, Vertedero, Dispositivos para disparar la energía, y Alimentadores del caudal ecológico

Conducciones hidráulicas. Toma de agua, Canales, Túneles, Tuberías forzadas y Casa de Máquinas

Presas: Las presas se utilizan fundamentalmente para derivar agua del cauce del río al sistema de conducciones hidráulicas del aprovechamiento. Las presas también pueden utilizarse para aumentar el salto necesario para generar la energía requerida. La elección del tipo de presa viene en gran medida condicionada por los entornos topográficos y geotécnicos del sitio. Por ejemplo si no hay un terreno rocoso, a una profundidad razonable, no se puede pensar en emplear estructuras rígidas del tipo de una prensa de hormigón. Asimismo, en un valle estrecho será difícil disponer de espacio para construir un aliviadero separado de la presa y la solución de una presa de hormigón con el aliviadero incorporado será la solución más acertada. En lugares en los que existen amplios valles con abundancia de arcillas y arenas silíceas, la solución de una presa de materiales sueltos, en cualquiera de sus múltiples variantes seguramente será la preferida. (Sinniger & Hager, 1989).

Las presas de hormigón presentan también sus inconvenientes pero más ventajas: Se adaptan a una gran

⁴ Luigi Papetti

variedad de valles, sean estos estrechos o amplios, siempre que las fundaciones sean sólidas, no son sensibles al desbordamiento, se puede ubicar el vertedero en su coronación y, si es necesario, toda la coronación puede convertirse en vertedero, en su interior pueden construirse fácilmente galerías de inspección, estructuras de drenaje, tuberías, etc y la casa de máquinas puede ubicarse en el mismo pie de la presa.

Una nueva generación de presas la constituyen las CFRD, en las que el elemento impermeable es una placa de hormigón colada en el paramento de aguas arriba. Esa placa está dividida en trozos longitudinales, unidas mediante unas juntas impermeables flexibles con cubrejuntas. Al pie de la presa, en el paramento aguas arriba, la placa está unida con un muro de arrostramiento de hormigón que constituye la transición entre el subsuelo de la roca y la placa de hormigón impermeable. Su formación correcta es indispensable para la estanqueidad de la presa. Con este sistema la presa está protegida contra desbordamientos.

Figura 1: Presa CFRD. Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo. Vuelo de reconocimiento.



En esta figura se expone la presa CFRD del proyecto Hidroeléctrico el Quimbo, en las que el elemento impermeable es una placa de hormigón colada en el paramento de aguas arriba. Esa placa está dividida en trozos longitudinales, unidas mediante unas juntas impermeables flexibles con cubrejuntas. Al pie de la presa, en el paramento aguas arriba, la placa está unida con un muro de arrostramiento de hormigón que constituye la transición entre el subsuelo de la roca y la placa de hormigón impermeable. Fuente: Elaboración Propia

Vertedero: La gran mayoría de los pequeños aprovechamientos son de los llamados de agua fluyente, en los que la electricidad se genera mientras fluye el agua por el cauce, y dejan de hacerlo cuando el caudal es inferior al mínimo técnico de las turbinas que lo equipan. En estos aprovechamientos, se levanta en el cauce una estructura que permita desviar un cierto caudal para conducirlo a la central. En su versión más elemental esa estructura es un simple obstáculo, capaz de remansar el agua, para poder derivar el caudal deseado y sobre el que continúa pasando agua.

Las estructuras móviles con compuertas pueden regular el nivel de agua, aguas arriba de las mismas, de forma que permanezca más o menos constante, para valores del caudal del río muy variable (naturalmente este objetivo no se puede conseguir en caso de avenidas). Si la configuración y tamaño de las compuertas lo permiten, también pueden utilizarse para evacuar los sedimentos acumulados en la toma. Estas estructuras son más costosas y delicadas que las fijas, requieren un mantenimiento más cuidadoso, y hay que asegurarse de que no falte nunca la energía para su accionamiento. Ya que su seguridad no es pasiva, como en las estructuras fijas. (Cruz, Materon, & Freitas, 2010)

En las figuras expuestas a continuación se puede observar el vertedero en su fase de construcción de la Hidroeléctrica el Quimbo.

Figura 2 y 3: Vertedero Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo en su fase de construcción con las respectivas compuertas.



Las estructuras móviles con compuertas pueden regular el nivel de agua, aguas arriba de las mismas, de forma que permanezca más o menos constante, para valores del caudal del río muy variable. Si la configuración y tamaño de las compuertas lo permiten, también pueden utilizarse para evacuar los sedimentos acumulados en la toma. Fuente: Elaboración Propia

Estructuras Para Disipar Energía: La descarga de las estructuras fijas o móviles descritas más arriba es, a la salida, en régimen generalmente supercrítico. Las elevadas velocidades y la turbulencia pueden dar lugar a fenómenos importantes de erosión en el pie de la presa, especialmente si el cauce no es rocoso, sino como es frecuente contiene arcillas, limos, arena, grava o rocas sueltas. Para evitar esos daños hay que acudir a la construcción de estructuras generalmente costosas. Las más utilizadas son: Cuenco amortiguador, cuenco disipador con bloques de hormigón, piscina de inmersión, rápidas de caída. La mayoría de estas estructuras disipan la energía de la corriente de agua mediante la formación de un “salto hidráulico” que disipa una gran cantidad de energía en una distancia relativamente corta. (Sinniger & Hager, 1989).

Estructuras de Toma de Agua: Una toma de agua tiene que desviar el caudal requerido para generar la energía, respetando el medio ambiente en que se integra, con la mínima pérdida de carga posible y sea cual sea la altura de la lámina de agua en el río. La toma actúa como zona de transición entre un curso de agua, que puede ser un río tranquilo o un torrente turbulento, y el canal de derivación por donde circula un caudal de agua, que debe estar controlado, tanto en cantidad como en calidad. Su diseño, basado en consideraciones geomorfológicas, hidráulicas, estructurales y económicas, requiere un cuidado especial para evitar problemas de funcionamiento y conservación a todo lo largo de la vida de la central. El diseño de una toma de agua obedece a tres criterios: Hidráulicos, estructurales, que son comunes a todas las tomas de agua y Operativos - control del caudal, eliminación de basuras, deposición de los sedimentos- que varían de toma a toma. Relacionados con el medio ambiente - barreras para impedir el paso de peces, escalas de peces - que son característicos de cada proyecto. A continuación se muestra las estructuras de toma en su fase de construcción del **Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo**. (EMGESA S.A E.S.P., 2008)

Figura 4: Estructuras de toma con rejillas del Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo



La toma de agua no debe ubicarse en una zona muerta, alejada del aliviadero, porque las corrientes parásitas propias de esas zonas, harán circular la broza y la dejarán delante de la reja. La toma de agua debe incorporar una rejilla para impedir la entrada de broza, una compuerta para poder aislar las estructuras situadas aguas abajo, una balsa de decantación para eliminar los sedimentos, un sistema de eliminación de

sedimentos con la menor pérdida posible de agua y un aliviadero para verter el exceso de agua si lo hubiera. En la figura se muestra las estructuras de toma en su fase de construcción del Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo. Fuente: Elaboración propia

Trampas de Sedimentos: Las tomas de agua en el cauce del río se diseñan para que no entren, ni los arrastres de fondo ni la maleza flotante, pero no pueden impedir la entrada de sedimentos suspendidos. El objetivo de las cubetas de sedimentación es impedir que los sedimentos se depositen en los canales hidráulicos, entren en las tuberías forzadas y, por encima de un cierto tamaño, dañen las turbinas y sus órganos de control. Para ello hay que introducir un ensanchamiento en la estructura hidráulica, para disminuir la velocidad del agua, y producir la precipitación. (Hita & N.H.C, 1987)

Tuberías Forzadas: Transportar un cierto caudal de agua (este es el objetivo de las tuberías forzadas) desde la cámara de carga hasta la casa de máquinas no parece tarea difícil, y sin embargo, el diseño de una tubería forzada no es asunto fácil. Las tuberías forzadas pueden instalarse sobre o bajo el terreno, según sea la naturaleza de éste, el material utilizado para la tubería, la temperatura ambiente y las exigencias medioambientales del entorno. (Parmakian, 1963)

El cuarto requerimiento es conocer al detalle los **equipos electromecánicos** que constituyen una PCH. Ya que el alcance de este documento no es netamente técnico, referenciamos y recomendamos consultar los libros de L. Vivier (Vivier, 1966)⁵, T. Jacob (Jacob, 2002) y otras publicaciones (Denis, 2002), (Harvey, 1993), (Siervo & Lugaresi, 1978), (Willace & Wilkinson, 1993).

Continuando la planeación estratégica, el **impacto ambiental, los procesos administrativos y legales** que requerimos para los permisos de la implementación de las PCHs los expondremos en este apartado. La construcción y operación de la represa y el embalse constituyen la fuente principal de impactos de centrales hidroeléctricas. Los proyectos de las represas de gran alcance pueden causar cambios ambientales irreversibles, en unas áreas geográficas muy extensas; por eso, tienen el potencial de causar impactos importantes. Los críticos más severos sostienen que los costos sociales, ambientales y económicos de estas represas pesan más que sus beneficios y que, por lo tanto, no se justifica la construcción de las represas grandes. Otros mencionan que, en algunos casos, los costos ambientales y sociales pueden ser evitados o reducidos a un nivel aceptable, si se evalúan, cuidadosamente, los problemas potenciales y se implementan medidas correctivas que son costo efectivas. El área de influencia de una represa se extiende desde los límites superiores del embalse hasta las lagunas de regiones tropicales y las regiones de costa y costa afuera, e incluyen el embalse, la represa y la cuenca del río, aguas abajo de la represa. Hay impactos ambientales directos asociados con la construcción de la represa (p.ej., el polvo, la erosión, problemas con el material prestado y de los desechos), pero los impactos más importantes son el resultado del embalse del agua, la inundación de la tierra para formar el embalse, y la alteración del caudal de agua, más abajo. Estos efectos ejercen impactos directos en los suelos, la vegetación, la fauna-flora y las tierras silvestres, la pesca, el clima y la población humana del área.

El beneficio del proyecto hidroeléctrico es la energía eléctrica, la misma que puede apoyar el desarrollo económico y mejorar la calidad de la vida en el área servida. Los proyectos hidroeléctricos requieren mucha mano de obra y ofrecen oportunidades de empleo. Los caminos y otras infraestructuras pueden dar a los pobladores mayor acceso a los mercados para sus productos, escuelas para sus hijos, cuidado de salud y otros servicios sociales. Además, la generación de la energía hidroeléctrica proporciona una alternativa para la quema de los combustibles fósiles, o la energía nuclear, que permite satisfacer la demanda de energía sin producir agua caliente, emisiones atmosféricas, ceniza y desechos radioactivos. Si el embalse es, realmente, una instalación de usos múltiples, es decir, si los diferentes propósitos declarados en el análisis económico no son, mutuamente, inconsistentes, los otros beneficios pueden incluir el control de las inundaciones y la provisión de un suministro de agua más confiable y de más alta

⁵ L, Vivier

calidad para riego, y uso doméstico e industrial.

El propósito de los reglamentos de protección ambiental es establecer los límites a aquellos elementos que presentan algún grado de peligro para las personas o el ambiente. Establece los procedimientos y medidas aplicables al sector eléctrico en actividades de generación de energía eléctrica, en todas sus etapas: construcción, operación, mantenimiento y retiro, se realicen de manera que prevengan, controlen, mitiguen y/o compensen los impactos ambientales negativos y se potencien aquellos positivos.

En el proceso de un estudio ambiental se tiene en cuenta a las diferentes instancias que están involucradas en el sector, bien sea desde la generación, transmisión, planificación o desde la gestión ambiental. Asimismo, se considera a los actores que tienen conocimiento del sector de energía eléctrica, de la temática ambiental relacionada y de los procesos de participación ciudadana que tengan información y que puedan aportar al proceso de estudio ambiental.⁶

Para el estudio ambiental que se requiere intervienen entidades tanto del sector público como privado, representantes de la sociedad civil incluyendo ONG's, universidades y organismos multilaterales encontrando así las siguientes: Ministerio de Minas y energía, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Departamento Nacional de Planeación (DNP), Ministerio del Interior y Justicia, Comisión Reguladora de Energía (CREG), Unidad de Planeación Minero Energético (UPME), Corporaciones Autónomas Regionales (CARs), Entidades de Control Procuraduría y Contraloría, Superintendencia de servicios públicos Domiciliarios, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Gobernaciones y Alcaldías, Senadores, Empresas Privadas encargadas de generación y transmisión, Organizaciones no Gubernamentales.

Para la construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras, se debe obtener la Licencia Ambiental otorgada por el Ministerio de Ambiente de Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). La Licencia Ambiental es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente, según lo establece la Ley 99 de 1993, el Decreto 1753 de 1994, el Decreto Ley 2150 de 1995, la Resolución 655 de 1996, el cual se obtiene mediante acto administrativo, a una persona natural o jurídica, para la ejecución de proyectos, obras o actividades, que causan deterioro grave a los recursos naturales renovables, al medio ambiente y al paisaje.

El artículo 30 del Decreto 1753 de 1994 y el 4 de la resolución 655 de 1996 establecen el procedimiento para obtener una licencia ambiental, el cual se presenta a continuación: Inscripción del proyecto, Definición por parte de la autoridad ambiental sobre la necesidad de un Diagnóstico Ambiental de Alternativas y fijación de los Términos de Referencia, en un plazo no mayor de 30 días hábiles, Presentación del Diagnóstico Ambiental de Alternativas. Presentado el Diagnóstico Ambiental de Alternativas, si es el caso, la autoridad ambiental en un plazo no mayor de 60 días elegirá la o las alternativas sobre las cuales deberá elaborarse el Estudio de Impacto Ambiental, si no es necesaria la presentación del Diagnóstico Ambiental de Alternativas, o elegida la alternativa, cuando no estén definidos los Términos de Referencia para el Estudio de Impacto Ambiental, la autoridad ambiental deberá fijarlos dentro de un término que no podrá exceder los 60 días hábiles, otro requisito es la presentación del Estudio de Impacto Ambiental. Presentado el Estudio de Impacto Ambiental, en caso de requerirse la autoridad ambiental pedirá información adicional al solicitante dentro de los 30 días hábiles siguientes a la presentación del estudio, presentación de información complementaria, solicitud de información adicional a otras autoridades en 15 días adicionales y que deberán ser remitidas en un plazo no mayor a los 60 días.

Recibida la información, o vencido el término de requerimiento de informaciones adicionales a otras

⁶ UPME Unidad de Planeación Minero Energética

autoridades, se expedirá el auto de trámite que declare reunida toda la información. A partir de la expedición de este auto, la autoridad ambiental deberá pronunciarse otorgando o negando la licencia ambiental respectiva, en un plazo máximo de 60 días. Cuando es competencia privativa del Ministerio del Medio Ambiente, este plazo será de 120 días. (Ministerio, 1999)

El Marco Normativo considerado para el estudio es el siguiente:

Constitución Política de Colombia

Establece principios y valores, así como derechos y deberes del Estado y de los particulares en relación con el medio ambiente.

Título I. De los Principios Fundamentales

Artículo 7. El Estado reconoce y protege la diversidad étnica y cultural de la Nación Colombiana.

Artículo 8. Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación

Título II. De los derechos, las Garantías y los Deberes

Capítulo 2: De los derechos sociales, económicos y culturales

Artículo 49. La atención de la salud y el saneamiento ambiental son servicios públicos a cargo del Estado. Se garantiza a todas las personas el acceso a los servicios de promoción, protección y recuperación de la salud.

Artículo 58. Función social y ecológica de la propiedad.

Artículo 63. Los bienes de uso público, los parques naturales las tierras comunales de grupos étnicos, las tierras de resguardo, el patrimonio arqueológico de la Nación y los demás bienes que determina la ley, son inalienables, imprescriptibles e inembargables.

Artículo 70. Las culturas.

Artículo 72. Patrimonio cultural.

Capítulo 3: De los derechos colectivos y del ambiente.

Artículo 79. Ambiente sano y participación de la comunidad.

Título XI. De la Organización Territorial

Capítulo 4: Del régimen especial

Artículo 330. Régimen de territorios indígenas.

Título XII. Del régimen económico y de la Hacienda Pública

Capítulo 2: De los planes de desarrollo.

Artículo 339. Habrá un plan de desarrollo conformado por una parte general y un plan de inversiones de las entidades públicas del orden nacional. (Gobierno Nacional, 1991)

Ley 56 de 1981

Capítulo II. Impuestos, compensaciones y beneficios

Artículo 4. Impuesto predial.

Artículo 5. Constitución de fondos especiales.

Artículo 7. Impuestos, tasas, gravámenes o contribuciones de carácter municipal diferentes del impuesto predial. (Gobierno Nacional, 1991)

Ley 141 de 1994

Fija regalías para la explotación de todo tipo de minerales metálicos y no metálicos para materiales de construcción como:

- Gravas es del orden del 1%.

- Para arenas y agregados es del 3%. (Gobierno Nacional, 1991)⁷

Ley 143 de 1994

Régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional

Resolución 1280 de 2006

Acoge los términos de referencia HE-TER-1-01 para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la Construcción y Operación de Centrales Hidroeléctricas Generadoras. (Gobierno Nacional, 1991)

Decreto de 136 de 1990

Artículo 6o. No se podrá otorgar licencia de exploración para proyectos de pequeña minería en aluviones de los ríos, de su margen, o de las islas ubicadas en sus márgenes. Expropiación.

Artículo 183. Solicitud de expropiación.

Artículo 185. Personería para demandar.

Artículo 186. Indemnización. (Gobierno Nacional, 1991)

Decreto 1320 de 1998

Reglamenta la consulta previa con las comunidades indígenas y negras para la explotación de los recursos naturales dentro de su territorio.

Decreto 948 de 1995

Reglamento de protección del aire.

Capítulo X. De la vigilancia, verificación, control y cumplimiento de las normas para las fuentes fijas.

Artículo 100. Las fuentes fijas contaminantes se clasifican por categorías, según el grado de reconversión tecnológica requerida.

Parágrafo 3. El Ministerio de Minas y Energía deberá presentar un plan de reconversión a tecnologías limpias para todas las hidroeléctricas y refinerías que operan en el país.

Capítulo XII. Participación ciudadana en el control de la contaminación atmosférica.

Artículo 136. Toda persona que se sienta afectada por la contaminación, podrá, sin formalidad alguna, verbalmente o por escrito, solicitar al Defensor del Pueblo de la localidad, o las autoridades ambientales, que se realice una verificación para determinar si se cumplen o no las normas ambientales y se proceda, si fuera el caso, a sancionar y corregir la causa de la contaminación. (Gobierno Nacional, 1991)

Aguas

- Alteraciones del Flujo Natural: artículo 3° del Código de Recursos Naturales

- Utilización: artículos 18 y 39 del Código de Recursos Naturales

- Aguas Negras: artículos 70, 142, 143 y 145 del Código de Recursos Naturales

- Para uso energético: artículos 73 y 77, Decreto 1541/78

- Varios: Decreto 1541/78

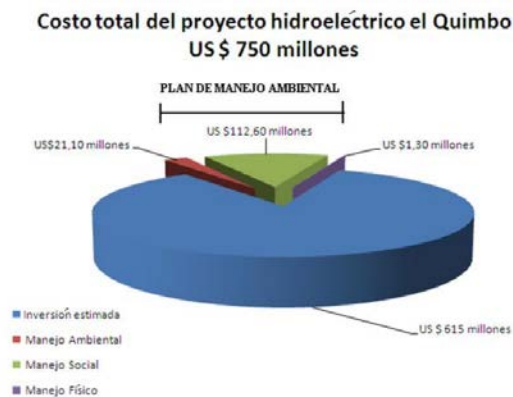
Continuando con los temas ambientales entramos a la ejecución del Plan de Manejo Ambiental PMA el

⁷ Constitución Política de Colombia

cual es el conjunto de programas, proyectos y actividades, necesarios para prevenir, mitigar, corregir y compensar los impactos generados por el proyecto durante las diferentes etapas. Para cada impacto identificado, debe formularse como mínimo un programa y/o proyecto como medida de manejo. (EMGESA S.A E.S.P., 2008) continuando con el Plan de manejo Social y el plan de manejo físico-biótico.

Adicionalmente se especificará el costo total del proyecto y del PMA

Figura 5: Ejemplo del Costo Total Hidroeléctrica el Quimbo



En la figura se muestra el costo total del Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo y especifica es costo del Plan de Manejo Ambiental PMA para exponer un ejemplo de lo que se debe presentar en el ítem del Costo del Proyecto. Fuente: (EMGESA S.A E.S.P., 2008)

Una vez se haya realizado lo anterior se continua con el plan de abandono y restauración final para aprovechar las instalaciones que el proyecto dejaría de utilizar y dar un uso compatible con las condiciones ambientales al embalse. Por último se entrega los planos y anexos que incluyen los mapas temáticos.

Siguiendo con nuestro planeamiento se debe ejecutar una **evaluación económica y un análisis de inversión**. Los pasos a considerar en la evaluación económica incluyen:

Un cuidadoso análisis de la evolución y características de la demanda a satisfacer; una evaluación de las fuentes y tecnologías que permitirán abastecer a la demanda, incluyendo PCH's y otras tecnologías con fuentes renovables, así como la extensión de las redes eléctricas desde sistemas centralizados, o la instalación de motogeneradores térmicos solos o en sistemas híbridos con fuentes renovables; la formulación de anteproyectos de inversión alternativos con las fuentes /tecnologías disponibles y la definición de la solución institucional con que se gestionará la financiación y el mantenimiento del sistema; el análisis de los costos y la solución de mínimo costo entre las alternativas propuestas; si se trata de un conjunto importante de proyectos con restricciones financieras, deben adoptarse criterios para, mediante el análisis beneficio /costo, ordenar los proyectos por prioridad para su ejecución.

La evaluación debe realizarse bajo los principios de la denominada evaluación social de proyectos. La evaluación social de proyectos no se realiza con base en los precios de mercado de las inversiones y gastos asociados al mismo, sino a los denominados precios de eficiencia (o precios sombra o precios de cuenta). Estos precios reflejan el uso óptimo o eficiente de los recursos de la sociedad de tal forma que, por ejemplo, si en el país existe fuerte desocupación de mano de obra no calificada, el precio de cuenta o precio de eficiencia de la misma será menor que el precio de mercado. De tal forma proyectos con alta incidencia de la mano de obra no calificada en sus costos tendrán un valor más competitivo a precios de cuenta que a precios de mercado cuando se los compare con los otros proyectos con menor incidencia de

este rubro. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía , 2006)

El resultado de este análisis se reflejará en la selección preferente de proyectos que utilicen más los recursos abundantes del país (por ejemplo mano de obra no calificada) y menos aquellos que son escasos (por ejemplo divisas).⁸

Los factores de mayor influencia en el costo de una PCH son los siguientes:

La relación de la calidad y potencial de recurso hídrico con el nivel de demanda que debe atender el proyecto.

Si la calidad del recurso es alta significa que tendremos mayor probabilidad de encontrar un aprovechamiento de bajo costo que cubra adecuadamente la demanda y en las proximidades de la misma.

A igual potencia el costo es menor si la obra de capacitación se resuelve sin necesidad de acumular agua en un embalse.

A igual potencia menores costos se corresponden a soluciones con mayores alturas y menores caudales y viceversa mayores costos corresponden a soluciones con menores alturas y mayores caudales.

A configuraciones similares de las obras, a medida que aumenta el módulo de potencia de la PCH, se reduce su costo unitario.

Tecnologías y modalidades constructivas adaptadas a este tipo y escala de proyectos.

El costo de la energía por su parte, permite comparar la competitividad de las PCH's frente a otras fuentes/tecnologías alternativas para abastecer la misma demanda.

La comparación entre proyectos alternativos puede realizarse también por la comparación de los flujos de fondos de inversión, de operación y de mantenimiento, descontados para un período de 15 o 20 años. En este caso deben considerarse, dentro del período, tanto la reposición de los componentes que agotan su vida útil como el valor residual de los componentes que no la han agotado al final del período. El análisis se facilita considerando el Costo Anual Equivalente, que integra una anualidad de los costos de inversión de obras e instalación de acuerdo a su vida útil y los costos anuales de operación y mantenimiento.

El Costo Anual Equivalente del Proyecto dividido por la demanda anual de energía que absorbe será el costo de la energía.

$$\text{C.E. (\$/kWh)} = \frac{\text{CAE total (\$/año)}}{\text{Demanda Energía (kWh/año)}} \quad (1)$$

Los factores que tienen mayor incidencia sobre el costo de la energía producida en las PCH's son los siguientes:

Por tratarse de proyectos de tipo capital intensivo, tienen alta sensibilidad al costo de la capacidad y a la tasa de descuento utilizada. A mayor tasa de descuento mayor resulta el CAE y en consecuencia al valor de la energía.

Por tratarse de proyectos con costos fijos, el precio de la energía estará asociado al factor de carga de la

⁸ Daniel Muguerza- Microcentrales Hidroeléctricas

central. Cuanto más tiempo se despache la central a plena capacidad, menor será el costo de la energía ya que el CAE se mantendrá constante.

Dependiendo de la incidencia de los costos de inversión por unidad de capacidad, del aprovechamiento de esta capacidad instalada y de la tasa de descuento utilizada en la evaluación, los costos de la energía producida en las PCH puede variar en un amplio rango de valores dependiendo al mercado actual.

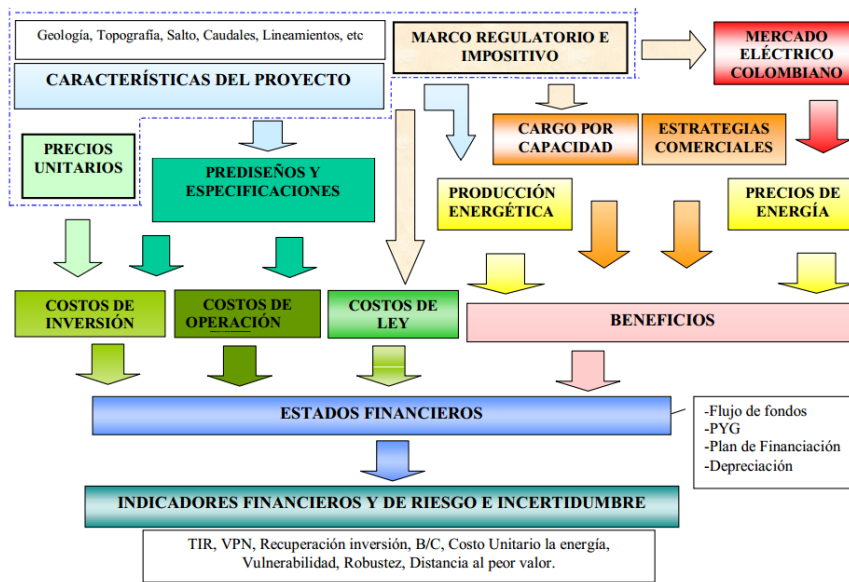
Los análisis de inversión para PCHs se apoyan en la toma de decisiones de inversión considerando el ambiente de competencia del mercado eléctrico colombiano, la regulación del sector y el riesgo e incertidumbre asociados, entre otros. Estos análisis nos permiten optimizar los principales parámetros de diseño de la PCH y evaluar su rentabilidad y viabilidad, mediante un estimativo de sus costos y beneficios. Los costos son estimados a partir de prediseños y especificaciones de las obras civiles y equipos. Así mismo los beneficios se estiman considerando la producción energética mediante la simulación de la operación aislada ante diferentes escenarios hidrológicos y el modelamiento del comportamiento del mercado eléctrico colombiano, simulando diferentes escenarios de expansión, hidrología, y demanda. La toma de decisiones de inversión en proyectos de generación en el sector eléctrico colombiano es cada vez más compleja. Los cambios han sido profundos, creando condiciones completamente novedosas para el sector, y un ambiente de gran incertidumbre en los procesos de toma de decisiones de inversión. Tanto los generadores establecidos, como los nuevos inversionistas que deseen incursionar en el Sector Eléctrico Colombiano –SEC- deben sustentar sus decisiones en análisis del mercado eléctrico, mediante la formulación de modelos de simulación que contemplen, entre otros, diferentes criterios de expansión, y escenarios de crecimiento de la demanda y disponibilidad hidrológica. Se requiere entonces herramientas que permitan a los inversionistas en el SEC analizar cuidadosamente sus posibilidades de inversión en un ambiente de competencia bajo condiciones de incertidumbre. (Jaramillo & Valencia, 2000)

Por esta razón, en este ítem se quiere enfocar una metodología de evaluación y optimización de proyectos de generación eléctrica, a través del diseño de una herramienta de apoyo en la toma de decisiones de inversión en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), que considere el ambiente de competencia del mercado eléctrico colombiano, la regulación del sector y el mercado de capitales, entre otros.

En la figura 6 se ilustra la dinámica de la evaluación de la inversión de PCHs, en donde el objetivo final de la evaluación es determinar indicadores financieros que permitan comparar y calificar la inversión; éstos indicadores se obtienen a partir de los estados financieros del proyecto, los cuales son construidos en el modelo tanto para el período pre-operativo o de construcción como para el período operativo; éstos indicadores se estiman a partir de los beneficios y costos del proyecto analizado. Los costos de operación corresponden a los costos en los que incurre el proyecto en su vida operativa, estos costos son los costos de administración, operación y mantenimiento (AOM), los cuales se obtienen a partir de información de PCH's existentes.

Los costos de ley pueden clasificarse en costos durante la inversión y costos durante la operación; los primeros son los que se incurren en el período pre-operativo y los cuales se pagan una sola vez y los segundos son los que se pagan a lo largo de la vida operativa del proyecto. En Colombia son considerados: Costos de ley durante la inversión: Costo de ley 56 de 1981 (la componente de inversión comprende: Fondos especiales municipales.- Impuesto predial, 3/1000 de todos los pagos que realice el proyecto)

Figura 6: Dinámica para la evaluación de inversión de las PCHs



Dinámica de la evaluación de la inversión de PCHs, en donde el objetivo final de la evaluación es determinar indicadores financieros que permitan comparar y calificar la inversión; éstos indicadores se obtienen a partir de los estados financieros del proyecto, los cuales son contruidos en el modelo tanto para el período pre-operativo o de construcción como para el período operativo; éstos indicadores se estiman a partir de los beneficios y costos del proyecto analizado. Fuente: (Wallace & Wilkinson, 1993)

Los Costos durante la operación: Costo de ley 56 de 1981: la componente de operación comprende (Impuesto predial, - Impuesto de Industria y comercio), Costos por ley 99 de 1993: (Creación del Ministerio del Medio Ambiente), - Artículo 45.- Transferencia del Sector Eléctrico (Transferencias al sector eléctrico), Ley 143 de 1994 (Ley eléctrica), Impuesto de renta, Costos de CND, ASIC, CREG y otros, Primas por seguros , Timbre, 4 X 1000 a todos los costos durante la operación del proyecto, FAZNI. Impuesto creado por la resolución CREG 039-2001.

Los beneficios del proyecto son debidos a sus ventas de energía, las cuales pueden ser realizadas a precios de bolsa o a través de contratos, el estimativo de éstas se obtiene a partir de su producción energética, de sus estrategias de comercialización y de los precios del mercado de energía tanto en bolsa o spot, como en contratos de mediano y largo plazo. Igualmente dependiendo de la estrategia de comercialización y operación la planta puede recibir remuneración por capacidad disponible. A continuación se describe como se plantean los anteriores elementos dentro del modelo propuesto para el cálculo de los beneficios.

Se propone un módulo que permite estimar la producción energética asociada al proyecto a analizar, a partir de sus características particulares como son: salto, caudal de diseño, afluencias diarias, eficiencia de los equipos y pérdidas de carga en las conducciones, empleando técnicas de simulación que estiman la energía media esperada del aprovechamiento, diferenciada en energía firme y secundaria.

Corresponden a las políticas de ventas de energía que asuman los operarios de la central, dependen de las leyes vigentes en Colombia, de la capacidad de la central, de la posibilidad o no de que la planta sea despachada centralmente, de la participación en el cargo por capacidad y de las perspectivas que se tengan de comercializar energía en contratos y en bolsa. El modelo contempla la reglamentación vigente para la operación de estas PCH en Colombia, y permite el análisis de diversas estrategias de comercialización con el fin de realizar sensibilidades y encontrar la forma de operación que optimice la rentabilidad del proyecto. El modelo incluye un módulo de simulación de la evolución del mercado eléctrico colombiano que permite obtener escenarios de precios de bolsa y prevé cual sería el momento propicio para realizar la inversión y entrar a operar la central; lo anterior a partir de la simulación de escenarios de demanda,

hidrología y expansión en capacidad del sector. Las tarifas de la energía para los contratos de mediano y largo plazo se obtienen a partir de las proyecciones de las tarifas del mercado spot simuladas en el módulo de evolución del mercado o de manera exógena según decida el analista.

Con respecto al marco regulatorio se involucran en el modelo las principales resoluciones que afectan la evaluación de PCH en Colombia: Resoluciones 086 de 1996, 24 de 1995, CREG-055-1994, CREG 116 de 1996.

Por último y uno de los temas más importantes de nuestro documento es la ***evaluación financiera*** la cual se realiza a partir de un módulo que permite simular los estados financieros del proyecto, asociados a escenarios definidos por las demás componentes del modelo durante el horizonte de análisis; éstos estados financieros permitirán estimar los indicadores de rentabilidad y solvencia para el proyecto y para el inversionista antes y después de impuestos (Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno, Período de Recuperación de la Inversión, Relación Beneficio / Costo y Costo Unitario de generación de la energía). Igualmente éste módulo establece las interacciones entre las diferentes variables del modelo y determina cómo reacciona la rentabilidad del proyecto ante los posibles cambios considerados en uno u otro parámetro. (Willace & Wilkinson, 1993)

Los indicadores financieros obtenidos en éste módulo para un escenario dado se estiman a partir de los ingresos y egresos del proyecto, mediante el flujo de caja, tanto para el proyecto como para el inversionista, antes y después de impuestos, y de otros estados financieros como son el plan de financiación, estado de pérdidas y ganancias (P&G) y depreciaciones bajo el marco regulatorio e impositivo vigente en Colombia.

Igualmente se realizan análisis de riesgo e incertidumbre a la inversión a partir de cálculos que permitirán tener una idea de la bondad de la misma.

Con todo lo expuesto anteriormente podríamos afinar el tema económico aclarando la evidencia del enorme potencial energético que posee Colombia y el cual está conformado por Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos. Tal potencial ofrece alternativas de generación de energía sostenibles y económicamente atractivas en prácticamente todo el territorio, especialmente en la región andina. Dentro de las innumerables ventajas que ofrecen las PCHs para la atención de la demanda eléctrica local se podrían resaltar: Solución energética para zonas no interconectadas del país, e incluso para atender total o parcialmente la demanda de muchos municipios menores dentro de la zona interconectada, la generación distribuida que se puede obtener con la implementación de PCHs, incide favorablemente en la expansión del sistema de transmisión nacional e incrementa considerablemente la confiabilidad del servicio en regiones constantemente afectadas por los atentados terroristas al sistema de transmisión, las PCHs constituyen alternativas financieramente atractivas que permiten la participación de inversionistas privados o entidades públicas locales en la expansión del sector, también podemos mencionar que requieren de tiempos de construcción mucho menores, incluso comparables con alternativas de generación térmica, facilitando la incursión de agentes privados en el servicio de generación eléctrica.

Adicionalmente, las PCHs representan una fuente de energía renovable, limpia y sostenible. Esta característica incluso puede significar ingresos para el proyecto a través de la negociación de los Certificados de Reducción de Emisiones de CO₂ contemplados en el Protocolo de Kyoto o acceder a fondos de financiación a través de los Mecanismo de Desarrollo Limpio.

La alternativa de generación resulta bastante competitiva en la atención de la demanda en los sectores industrial y minero e incluso para el suministro de electricidad a poblaciones y municipios. (Marin, 2010)

Con el fin de entender más el tema financiero para las Centrales Hidroeléctricas incluyo en este

documento como hasta el momento el Proyecto hidroeléctrico el Quimbo, donde me encuentro laborando en estos momentos se ha financiado para viabilizar la ejecución de dicho proyecto. Se diseñó una estrategia de financiación orientada a garantizar la disponibilidad de los recursos, mantener la alta calidad crediticia con la que cuenta la Compañía, lograr eficiencia en costos financieros y minimizar la exposición a riesgos de tipo de cambio y tipo de interés. Esta estrategia se ha venido ejecutando en dos fases, así:

Fase I - Emisión de bono internacional y fuentes de respaldo (2010-2011): Implicó la incursión de EMGESA como emisor en el mercado internacional de capitales mediante la emisión del primer bono internacional de un corporativo colombiano denominado en pesos y pagadero en dólares a una tasa de interés fija y por un monto de \$736.760 millones (alrededor de USD 400 millones), de los cuales \$646.760 millones de pesos se destinaron a la financiación del proyecto. Adicionalmente, desarrollamos en conjunto con la banca local instrumentos que permitieran disponer de recursos adicionales de respaldo para el proyecto durante la construcción. Como resultado, se contrataron líneas comprometidas con la banca local en enero de 2011 por \$360.000 millones, en las cuales se establece la obligación por parte de los bancos participantes de otorgar créditos a EMGESA en el momento en que ésta los requiera, aunque exista incertidumbre en los mercados en el momento del desembolso. Así mismo, se obtuvo la disponibilidad de una línea de crédito intercompañía con CODENSA hasta por USD 300 millones.

Fase II – Optimizar el costo de financiamiento (2012-2015): Luego de contratados los mecanismos de respaldo para atender las necesidades del proyecto en todo momento, los esfuerzos se han orientado a contar con la flexibilidad necesaria en plazos y fuentes y así minimizar el costo de la deuda. Por lo tanto, una vez agotados en octubre de 2012 los recursos de la emisión del bono internacional emitido en 2011, las necesidades del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo se financiaron con créditos intercompañía de corto plazo con CODENSA y se monitorearon permanentemente las condiciones del mercado local e internacional, con el fin de identificar el mejor momento para emitir un nuevo bono que permitiera refinanciar a largo plazo los recursos tomados de corto plazo, y adicionalmente asegurar recursos para la financiación de las inversiones de los meses siguientes a un costo financiero adecuado. Tras este seguimiento de las condiciones del mercado, en diciembre de 2012 se emitió el Cuarto Tramo bajo el Programa de Emisión y Colocación en el mercado de capitales local por \$500.000 millones, obteniendo dichos recursos a una tasa media de IPC + 3,57%. Finalmente, en septiembre de 2013 se emitió el Quinto Tramo bajo el Programa de Emisión y Colocación en el mercado de capitales local por \$565.000 millones a una tasa media de IPC + 4,73%.

De esta forma, considerando el presupuesto aprobado hasta el momento del proyecto y el estado de ejecución de las fases I y II de la estrategia de financiación, a diciembre de 2013 EMGESA contaba con financiación ejecutada y respaldos por el 90% del valor estimado de la inversión en el proyecto, aportando tranquilidad financiera y viabilidad en términos de recursos económicos para continuar adelantando las inversiones requeridas para su ejecución. (EMGESA S.A E.S.P., 2014).

Las perspectivas sobre el desempeño de la economía colombiana en el 2015 son positivas. Al igual que en los últimos meses, se espera que este año la economía local se vea impulsada por un mejor contexto internacional, reflejado posiblemente en crecimientos más acelerados en la economía de los Estados Unidos, principal socio comercial de Colombia, y en tasas de crecimiento positivas, aunque bajas, en la zona euro.

Sin embargo, algunas señales de fragilidad en la recuperación de las economías desarrolladas no permiten alcanzar un optimismo definitivo. Es bastante probable que este año se continúen sintiendo en los mercados financieros internacionales los efectos del desmonte gradual de los estímulos monetarios establecidos por la Reserva Federal de los Estados Unidos; en lo que respecta a la zona euro, a pesar de la mejoría en algunos de sus indicadores, el mercado laboral continúa mostrando altas tasas de desempleo, las ventas al por menor no despegan y el crédito no da señales de repuntar. A este panorama se suma que

la economía China ha empezado a mostrar un menor ritmo de crecimiento, explicado por un posible sobredimensionamiento de su capacidad instalada.

Por fortuna, la economía colombiana ha contado en los últimos años con sólidos fundamentos macroeconómicos que le permitirán seguir mostrando un buen desempeño. En 2015 se espera que el país se vea impulsado por el plan de inversiones estatales en infraestructura de transporte, así como por la buena dinámica que viene mostrando el sector de la construcción de vivienda, estimulado por las políticas gubernamentales que incluyen la entrega de viviendas gratuitas y subsidios de financiación. Así mismo, se prevé que se sientan con más fuerza los efectos del Plan de Impulso al Empleo y la Productividad (PIPE) que lanzó el Gobierno Nacional desde 2013.

El sector industrial, que en 2014 presentó contracciones en su crecimiento, podría tener un mejor desempeño en 2015. A partir del recorte gradual de los estímulos monetarios por parte de la Reserva Federal de los Estados Unidos, se tiene la expectativa de un menor flujo de dólares hacia la economía colombiana, lo que derivaría en una depreciación del peso contra el dólar y a su vez en mayores niveles de competitividad por tipo de cambio que favorecerían a la industria.

En cuanto al sector energético, se espera que retorne a niveles normales de producción, luego de verse afectado en el 2013 por las huelgas ocurridas en las dos principales empresas productoras de carbón que operan en el país.

También existen expectativas positivas sobre el dinamismo del consumo privado en Colombia para 2015, como resultado de que posiblemente el crédito con destino a los hogares se expandirá a un mayor ritmo con respecto al año anterior.

Estas buenas perspectivas que se tienen sobre el desempeño de la economía local en 2014, favorecen la percepción de los analistas económicos, quienes esperan que este periodo arroje un mayor crecimiento del Producto Interno Bruto colombiano con respecto a 2014. (EMGESA S.A E.S.P., 2014).

RESULTADOS

Como resultado a este documento el cual nos da las pautas para la ejecución general de una PCH, es la ganancia en conocimientos tanto técnicos como administrativos los cuales nos muestran la viabilidad en nuestro país para construir este tipo de proyectos; Colombia es muy rico en recursos hídricos y nos muestra que el principal requerimiento para implementar esta tecnología es el acceso a caídas de agua o cauces con posibilidad de embalsamiento. Es así como estos sistemas requieren, como componentes principales, de sistemas hidráulicos para el embalse, conducción de aguas, turbinas, generadores y, en muchos casos, sistemas de respaldo.

Este documento nos expuso que las centrales cuentan con un gran potencial de crecimiento en su implementación, principalmente por ser ambientalmente sustentables, pese a que los costos de generación no son bajos en comparación con una gran central de embalse. Esta tecnología se aplica para obtener energía eléctrica y, en menor medida, energía mecánica. Son centrales que aprovechan la energía cinética de los cauces naturales de agua y utilizan el desvío de una fracción del caudal de un río, con el fin de aprovechar la caída de agua para lograr el movimiento de las turbinas. Éstas se encuentran conectadas a un generador, el que produce energía eléctrica. El agua se usa de modo no consuntivo, lo que significa que es devuelta río abajo al cauce de donde se extrajo o, a un nuevo cauce, procurando minimizar los impactos ambientales producto de este desvío.

Debemos destacar que nuestro estudio se refiere a una tecnología de abastecimiento descentralizado de

electricidad, cuya difusión puede apoyarse tanto en el interés privado como en el sector público. Pero en cada caso tenderá a resolver necesidades de diferentes naturalezas. En el primer caso se trata de una solución alternativa dentro de un menú de opciones que se presentaran a potenciales usuarios en respuesta a su "demanda solvente" y su penetración en el mercado estará apoyada en las condiciones de competitividad (confiabilidad, precio, financiación, servicio postventa, etc.) que presenta dicha tecnología. En el segundo caso, la presencia activa del sector público esta generalmente relacionada a una acción directa o indirecta del gobierno para promover el uso de esa tecnología alternativa como instrumento de sus políticas de desarrollo científico, económico o social. Es en este escenario donde se inscribe el caso analizado en el estudio ya que se trata de resolver el abastecimiento eléctrico de usuarios rurales con escasa o nula capacidad de pago, en respuesta de sus necesidades energéticas (expresadas a través de sus requerimientos) y no solo a la demanda solvente.

Una de las características principales que ha contribuido con la replicación de las PCHs es que la instalación parte de la necesidad de la población por acceder al servicio de electricidad y como sabemos existe un porcentaje alto de población rural que no cuenta con ello.

La ventaja del modelo organizativo empresarial en las comunidades rurales es que la administración con enfoque en los procesos y con concepción de proyecto se adapta a la organización local y/o familiar. La participación de personas que se conocen bien entre sí implica niveles más altos de organización e integración, lo cual no siempre está presente cuando la administración de las PCH está en manos de los gobiernos locales. Por lo tanto, cuando son estos últimos los adjudicatarios, los recursos humanos son el aspecto crítico para la sostenibilidad. Es más, según algunas investigaciones y experiencias recogidas de ONG's financiadas de proyectos de electrificación rural, los problemas de implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas se han registrado sobre todo en el aspecto "institucional", es decir, en relación a la organización que dirigirá el proyecto una vez que se haya implementado la infraestructura requerida para la operación. Sin embargo, una dificultad para el modelo organizacional de pequeña empresa es que todo el marco legal al respecto ha sido conceptuado principalmente para áreas urbanas. Así que es importante asesorar a la comunidad en relación al desarrollo de proyectos y capacitar a algunas personas en la administración del sistema, por ejemplo, en el manejo de la tecnología, en la administración de las tarifas, etc. Como el nivel educativo es una limitante durante el proceso de capacitación, es importante plantear estrategias metodológicas prácticas y fáciles de entender para transmitir el conocimiento y permitir que este sea aprehendido, enriquecido y replicado.

El proceso de planificar, ejecutar y operar una PCH de manera participativa ofrece una oportunidad tal vez única a las comunidades para el fortalecimiento de su cohesión y capital social.

Los pagos se encuentran dentro de sus posibilidades reales y se ve la calidad, seriedad y transparencia en el servicio. Los aportes o pagos que se dan también influyen en la posibilidad de réplica en otras zonas, porque si los pagos son menores que en sistemas convencionales y el beneficio de la instalación de la PCH es alto, se fomentará interés por el sistema en otras zonas. Lo indicado se sabe por los testimonios y comentarios que manifestó la población.

En el caso de los temas financieros podemos afirmar que los aportes o pagos que se dan también influyen en la posibilidad de réplica en otras zonas, porque si los pagos son menores que en sistemas convencionales y el beneficio de la instalación de las PCH es alto, se fomentará interés por el sistema en otras zonas.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista hidráulico, el funcionamiento de las PCHs generan energía como cualquier otra, es decir, transforman la energía hidráulica en electricidad, aprovechando la diferencia de desnivel existente

entre dos puntos. La energía se transforma primero en energía mecánica en la turbina hidráulica, ésta activa el generador, que transforma en un segundo paso la energía mecánica en energía eléctrica.

Se deben tener en cuenta las distintas partes del proceso y los costos que implica cada una: la fase de proyecto, la ejecución y por último, la fase de funcionamiento, además de considerar la orografía del terreno, los accesos, el tipo de instalación, el tamaño, la potencia y el punto de conexión entre cada una de las fases.

Cabe destacar que las PCHs son más rentables que las centrales de embalse, debido a que el tiempo que demora construirlas es mucho menor que el de una central de embalse, por lo que se recupera la inversión de forma más rápida. Por otra parte, el beneficio económico a futuro se ve reflejado en el costo de mantenimiento que tienen las mini centrales respecto de las grandes. Además las mini centrales de pasada utilizan el recurso agua de manera equilibrada y controlada, lo que reduce enormemente el impacto ambiental que producen los embalses al inundar miles de hectáreas. Por lo mismo se considera que la “minihidráulica” es una energía renovable, debido a que la relación entre los impactos ambientales que generan y los beneficios que producen son más aceptables.

La energía de las PCHs depende netamente de las condiciones climáticas del sector, por lo que su aplicación en ciertos lugares, que no tengan los recursos hidráulicos necesarios, puede llegar a ser inviable.

El uso no consuntivo del agua es de gran importancia, ya que toda el agua que se ocupa en las PCHs es devuelta al cauce natural del río en una cota inferior, como si nunca se hubiese utilizado esa agua.

Se puede afirmar que las PCHs son un método particular de generación de energía eléctrica, que en comparación con las mega centrales tiene aspectos muy positivos, como la rápida recuperación de la inversión, el casi nulo impacto ambiental, y por supuesto la diferencia de costos tanto en mantenimiento como en inversión entre estas centrales y aquellas de mayor escala, sin embargo no son lo suficientemente productivas, o más bien, no tienen la misma cantidad de producción energética que una central más grande, lo que la hace siempre ser una opción para proyectos de menor escala y/o menor demanda.

La regulación del mercado eléctrico colombiano fue diseñada y está sustentada con una orientación en primer lugar de suplir la demanda, en segundo lugar de hacerlo al menor costo y en tercer lugar de garantizar la confiabilidad del suministro. Bajo estos pilares y dada la disponibilidad de recursos en el país, los resultados muestran que las alternativas tecnológicas que mejor se ajustan a estos pilares son las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHs).

Es importante para Colombia diversificar sus fuentes de generación eléctrica para evitar un aumento significativo en emisiones de GEI a 2025 (aumento del 100%) y reducir la vulnerabilidad del sistema ante posibles efectos del cambio climático.

En Colombia existe potencial para el desarrollo de energías renovables no convencionales, sin embargo, la estructura regulatoria actual hace que la diferencia en rentabilidad entre estas tecnologías y las convencionales se incremente, dificultando su entrada en el mercado. El hecho de que cada vez es más difícil y tardado construir grandes proyectos hídricos con embalse hace relevante explorar la alternativa de pequeñas centrales de energías renovables cercanas a los centros poblacionales.

Uno de los principales problemas de las energías renovables en Colombia es que los sitios en que hay abundancia de los recursos naturales (viento, energía solar, fuertes caídas de agua, actividad volcánica) se encuentran en zonas de reserva natural o de propiedad indígena o afrocolombiana. La falta de claridad en

la legislación sobre los procesos de la consulta previa pueden dificultar y hacer más costoso el desarrollo de estas tecnologías.

Previo a la ejecución de una PCH, se deben cumplir las normas, decretos y reglamentos existentes en el país, de preservación del medio ambiente. Así mismo es importante observar las normas internacionales que, aunque no sean de obligatorio cumplimiento en nuestro país, puedan hacer ambientalmente más viables los nuevos proyectos hidroeléctricos.

Se requiere conocer las entidades reguladoras que deben participar para el otorgamiento de la licencia ambiental como los ministerios de Minas y Energía, Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, DNP, IDEAM, UPME, Agentes del sector eléctrico, Gremios como ACOGEN, ANDESCO, ASOCODIS, ANDI, CREG.

Colombia posee alrededor de 100.000 MW identificados en recursos hídricos para la generación de la electricidad y puede proseguir por muy largo tiempo utilizando este recurso para fines de generación de energía eléctrica.

Los análisis ambientales requieren de un estudio independiente de evaluación del impacto ambiental, con el objeto de determinar los efectos sobre el medio ambiente, en sus etapas de construcción, operación y retiro, dichos estudios deberán incluir el diseño de los planes de manejo ambiental de mitigación y/o recuperación de las áreas afectadas y el análisis de costos correspondientes.

La importancia de la expansión en generación en el sector eléctrico colombiano, las plantas en operación y los proyectos en construcción son fundamentales para garantizar el suministro eléctrico del país en los próximos años.

Es muy importante difundir en el ámbito académico la importancia de los aspectos técnicos, administrativos y ambientales en el desarrollo de grandes proyectos de infraestructura eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

ACOLGEN, Asociacion Colombiana de Generadores de Energia Electrica . (2010). *Construccion de Plantas de Generacion Proceso de Licenciamiento* . Santa Fe de Bogotá: UPME.

Annels, A. (1991). Mineral deposit evaluation. A practical approach. Londres: Chapman & Hall.

Bustillo Revuelta, M., & Lopez Jimeno, C. (1997). *Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras*. Madrid.

Carniglia, Marcus F. ;Grossi, Jorge H. (2013). *Diseño de caras de Hormigon en Presas CFRD de Gran Altura. Analisis y Tendencias*. San Juan, Argentina: Techint Ingenieria y Construcccion.

CREG Comision reguladora de energia y gas. (3 de Octubre de 2006). RESOLUCION CREG 071 DE 2006. *Cargo por Confiabilidad del mercado mayorista de energia*. Bogota, Colombia.

Cruz, P., Materon, B., & Freitas, M. (2010). *"Concrete Face Rockfill Dams" Proceedings*. Brasil: Oficina de textos. 1 Edicion.

- Denis, V. (2002). *Petites Centrales hydrauliques*. EPFL.
- Diéz-Cascón, J. (2001). Ingenieria de Presas, presas de fabrica. En F. B. Hernandez, *Presas de fabrica* (pág. 471). Cantabria: Srevicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- EMGESA S.A E.S.P. (2008). *Estudio de impacto Ambiental del Proyecto Hidroelectrico el Quimbo* . Huila.
- EMGESA S.A E.S.P. (2014). *Memoria Anual Estados Financieros Emgesa* . Bogota D.C.
- French, R. (1988). *Hidraulica de Canales Abiertos* . Mexico: McGraw-Hill Book Co.
- García Orche, E. (1999). *Manual de evaluación de Yacimientos*. madrid.
- Gobierno Nacional. (1991). *Constitucion Política de Colombia*. Bogota D.C.
- Harvey, A. (1993). *Micro hidro desing Manual*. London: Intermediate Technology Publications.
- Hita, C., & N.H.C, H. (1987). *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems*. New Jersey: Englewood Cliffs.
- INGETEC Ingenieria y Diseño. (2013). *Exploracion de Fuentes Aluviales Externas*. Gigante, Huila: Ingetec S.A.
- INGETEC, Ingenieria y Diseño. (2013). *Exploracion de Fuentes Aluviuales Internas*. Gigante, Huila: Ingetec S.A.
- INGETEC, Ingenieria y Diseño. (2014). *Estudio de Impacto Social y Ambiental para Fuentes Aluviales Externas*. Bogota: Ingetec S.A.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energia . (2006). *Minicentrales Hidroelectricas* . IDAE.
- Jacob, T. (2002). *Machines Hydrauliques Et Equipements Electro-Mecaniques*. EPFL.
- Jaramillo, G., & Valencia, D. (2000). *Decisiones con Multiples Objetivos e Incertidumbre para PCHs*. Medellin: Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia.
- Lepe, J. L. (1993). *Diseño de Estructuras de Concreto* . Mexico D.F.: Mc. Graw Hill.
- Llamas, j. (1933). *Hidrologia General Principios y Aplicaciones*. España: Editorial de la universidad del Pais Vasco.
- Marin, R. (2010). *Estadisticas Sobre el Recurso de Agua en Colombia* . Bogota D.C.: HIMAT.
- Martínez, E., & Elena, G. (2007). *Diseño de Pequeñas Presas* . España: Bellisco.
- Ministerio de minas y energia. (13 de Octubre de 2.014). www.creg.gov.co. Recuperado el 13 de Octubre de 2.014, de <http://www.creg.gov.co/index.php/regulacion>: <http://www.creg.gov.co/index.php/regulacion/resoluciones>

Ministerio, d. A. (1999). *Guía Ambiental para Proyectos de Transmisión de Energía Eléctrica*. Bogotá D.C.

Parmakian, J. (1963). *Waterhammer analyses*. New York: Dover Publications.

PTO. (2014). *Plan de Trabajo y Obras Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo*. Gigante, Huila.

Siervo, F., & Lugaresi, A. (1978). *Modern Trends in Selecting and Designing Francis Turbines*. Dam Construction.

Sinniger, & Hager. (enero de 1989). *Constructions Hydrauliques*. Lausanne, Huila, Colombia: PPUR.

Vivier, L. (1966). *Turbines hydrauliques Et Leur Regulation*. Paris: Albin Michel.

Willace, R., & Wilkinson, T. (1993). *Sistemas de Bases de Datos para Evaluar Micro Centrales Hidroeléctricas*. Reino Unido : Universidad de Edimburgo.

www.eeb.com.co/transmision-de-electricidad/sector-energetico-en-colombia. (2014). Recuperado el 2014 de septiembre de 2014, de empresa de energía de bogota: www.eeb.com

RECONOCIMIENTO

Agradezco el apoyo de la empresa EMGESA S.A. E.S.P. en la cual laboro actualmente, la cual me facilitó mucha información y a los funcionarios especialistas en las distintas áreas por su ayuda, comentarios y observaciones que contribuyeron a hacer de esta investigación un documento de mejor calidad.

BIOGRAFIA

Julio César González Hernández es Ingeniero Geólogo especialista en Geotecnia Vial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), actualmente encargado de la parte Geológica y Geotécnica del Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo el cual está en su fase de construcción. Se puede contactar en la empresa EMGESA S.A E.S.P en la división de Dirección Técnica en el correo electrónico jgonzalezher@endesacolombia.com.co o en correo personal ingcesar@gmail.com