



Informe Pasantía

Generación de Energía Sostenible para la formación de Ice Stupas

Ingeniería Civil Mecánica – Ingeniería Civil Industrial

Alumno:

Mario Lucas Herrera Bascuñán

Supervisor:

Sebastián Goldschmidt

Profesor Guía:

Mauricio Campillo

AÑO 2023-2-SEM

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
Contexto de la empresa	5
Contexto de la oportunidad	5
Funcionamiento del Sistema Generador de Ice Stupas Tradicional.....	7
OBJETIVOS	10
Objetivo general S.M.A.R.T.....	10
Objetivos Específicos	10
ESTADO DEL ARTE	11
ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	12
Matriz de riesgos	15
EVALUACIÓN ECONÓMICA	16
METODOLOGÍAS	19
MEDIDAS DE DESEMPEÑO	20
PLAN DE IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO	21
DESARROLLO.....	22
Planeación (Fase I)	22
Diseño de Concepto (Fase II)	22
Diseño a nivel sistema (Fase III)	23
Diseño de detalle (Fase IV) - Etapa de generación.....	24
Estudio Ambiental de la Implementación.....	31
Plan de Implementación del Sistema Energético.....	31
RESULTADOS	34
Cuantitativos.....	34
Cualitativos	36
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	39
Conclusión.....	39
Recomendaciones.....	40
REFERENCIAS	41
ANEXOS.....	42

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto de titulación se realizó en Nilus, dirigido por Unit Spa. El proyecto se enfocó en desarrollar tecnologías para combatir la escasez de recursos hídricos, específicamente mejorar y disminuir los impactos en términos operativos, económicos y ambientales de la construcción e implementación del Parque hídrico de 50 Glaciares Artificiales, denominados Ice Stupa. Lo anterior se logra mediante la implementación de un "Ice Stupa Hermano" sobre la base de un Ice Stupa existente, disminuyendo el impacto asociado a la construcción del parque hídrico. Esta tecnología permite almacenar agua en temporadas de invierno y posteriormente entregarla gradualmente en épocas estivales, lo que se traduce en la recuperación de ecosistemas y glaciares; en su derivada, se comprende como una alternativa para la crisis hídrica y la disminución de dióxido de carbono en la atmósfera.

En primera instancia, se explica el funcionamiento completo del sistema generador de Ice Stupas y en qué punto del sistema se desarrollará la oportunidad. La manera de generar un "Ice Stupa Hermano" está asociada a aprovechar la energía que conlleva el flujo del agua en momentos de no congelamiento (15 horas al día). Esta energía permite alimentar una bomba de 1 Hp (560 [W]), la que se alimenta del flujo de agua que no es utilizada para generar Ice Stupas en periodos de congelamiento (9 horas al día).

El diseño del sistema energético que permite alimentar la bomba generadora de un "Ice Stupa Hermano" se basó en la metodología de "Proceso de desarrollo de producto" de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger, permitiendo desarrollar con profundidad el diseño del sistema. Esta metodología permitió desarrollar el sistema en tres etapas: generación, almacenamiento y suministro energético. El desarrollo de la primera etapa llegó hasta la fase de diseño de detalle, debido a la necesidad de aprovechar al máximo las condiciones de borde impuestas para el sistema. En cambio, las otras etapas se desarrollaron hasta la fase de diseño a nivel de sistema. El nivel de información entregada por las fases desarrolladas permitió evaluar y validar la factibilidad técnica, económica y operativa de la implementación del sistema en la Cordillera de los Andes, específicamente en el Cajón del Maipo.

Dentro de los resultados se válida que el proyecto es económicamente rentable con una TIR del 37%, por lo que se recomienda como alternativa para generar el parque hídrico de 50 Ice Stupas que Nilus tiene contemplado implementar en el futuro. Sobre esta base, se postula la viabilidad y mejora medioambiental que produce la implementación del proyecto, mediante el aumento del 28% del almacenamiento del recurso hídrico en la región (565.000 [m³] de agua) con la implementación de 25 Ice Stupas y 25 "Ice Stupas Hermanos". Finalmente, se desarrolló un plan de implementación para ensamblar el sistema diseñado en la cordillera, considerando las restricciones y dificultades inherentes al transporte de materiales en la alta montaña.

ABSTRACT

In this report, we will delve into the graduation project carried out at "Nilus," under the direction of Unit Spa. The Project is focused on developing technologies to combat water resource scarcity, specifically improving and reducing the operational, economic, and environmental impacts of constructing and implementing 50 Artificial Glaciers, called Ice Stupas. This is achieved by implementing a so-called "Ice Stupa Brother", feeded and based by an existing system for Ice Stupa generation, generally reducing the associated project impact. This technology allows for storing water in winter seasons and gradually delivering the stored water in summer seasons. The hydration effect in summer translates into ecosystem recovery and glacier restoration, serving as an alternative to the water crisis and carbon dioxide elimination in the atmosphere.

Initially, we explain the complete functioning of the Ice Stupa generation system and the specific point in the system where the opportunity will be developed. The method of generating an Ice Stupa Brother is associated with the opportunity to harness the energy carried by the water flow during times when generating Ice Stupas is not convenient (15 hours per day). This energy will power a 1 Hp (560 [W]) pump feed by the unused flow for freezing during freezing periods (9 hours per day).

The design of the energy system, which powers the pump generating an Ice Stupa Brother, is based on the "Product Development Process" methodology by Karl T. Ulrich and Steven D. Eppinger. This methodology allowed for an in-depth development of the system design. The same methodology resulted in diversifying the system's development into three stages: generation, storage, and energy supply, each at a different level of development. Specifically, the need for the energy generation stage to make the most of the system's boundary conditions dictated the detailed design level of each stage. The level of detail provided by the development phases allowed for evaluating and validating the technical, economic, and operational feasibility of implementing the system in the Andes mountains.

Regarding the results, it is understood that the project is economically viable, delivering an Internal Rate of Return (IRR) of 37%. Therefore, it is recommended as an alternative for generating the 50 Ice Stupas that Nilus plans to implement in the future. Based on this, the project's viability and environmental improvement are postulated, with a 28% increase in water resource storage (565,000 [m³] of water) in the region where the Artificial Glaciers Brothers are implemented per season. Likewise, an implementation plan was developed to assemble the designed system in the mountains, considering the inherent restrictions and difficulties of transporting materials at high altitudes. This translated into bringing all the elements to the site in just 6 trips.

INTRODUCCIÓN

Contexto de la empresa

Unit SpA es una empresa chilena fundada en 2018 que destaca por su enfoque en el desarrollo de soluciones tecnológicas impulsadas por la inteligencia artificial y desarrollar propuestas innovadoras para enfrentar problemáticas del mundo actual. Su orientación se extiende a diversas industrias y áreas, tales como la Minería, Clientes Multinacionales con requerimientos específicos (BHP, AMSA, Copec, Coca Cola, entre otras.) y el Medio Ambiente. En esta última surge Nilus, proyecto enfocado en combatir la crisis hídrica de la región en base a soluciones inspiradas en la naturaleza.

El objetivo del Proyecto Nilus es desarrollar tecnologías para enfrentar la escasez de recursos hídricos y hacer frente al cambio climático. Tiene su principal foco en la implementación y desarrollo de glaciares artificiales, denominados Ice Stupas, lo que permite almacenar agua durante la temporada de invierno, para posteriormente entregarla gradualmente durante la época estival. Lo anterior, permite abordar la falta de recursos de almacenamiento de agua en elevaciones superiores de una cuenca hidrográfica. Dentro de los impactos que genera la implantación de estos dispositivos se contemplan la recuperación de ecosistemas, almacenamiento de agua limpia y recuperación/mantenimiento de glaciares actuales. Como derivada de los impactos directos que surgen por la implementación del proyecto se contempla: la generación de vegetación capaz de reducir CO₂ de la atmósfera y mejorar la calidad de vida de la flora y la fauna del ecosistema circundante. Nilus, de forma simultánea, investiga y desarrolla nuevas tecnologías para mejorar la formación de Ice Stupas.

Contexto de la oportunidad

Actualmente los Ice Stupas de Nilus se encuentran en nivel de desarrollo TLR 7 (demostración de sistema o prototipo en un entorno real), lo que permite el funcionamiento de 4 Ice Stupas, ubicados en el Parque Arenas, Cajón del Maipo, Región Metropolitana, Chile (Figura 1). El funcionamiento de este grupo de Ice Stupas permite un almacenamiento total de 80.000 [m³] de agua por ciclo anual. En vista de que estas estructuras de hielo artificial, en términos de almacenamiento en m³ agua e hidratación del ecosistema, están entregando resultados positivos, es que en un corto plazo se considera la creación de un parque hídrico, lo que significa la implantación de un total de 50 Ice Stupas en el Parque Arenas. Considerando lo anterior, se estima que la creación de este parque hídrico permitirá el almacenamiento más de 1.000.000 [m³] de agua anuales.

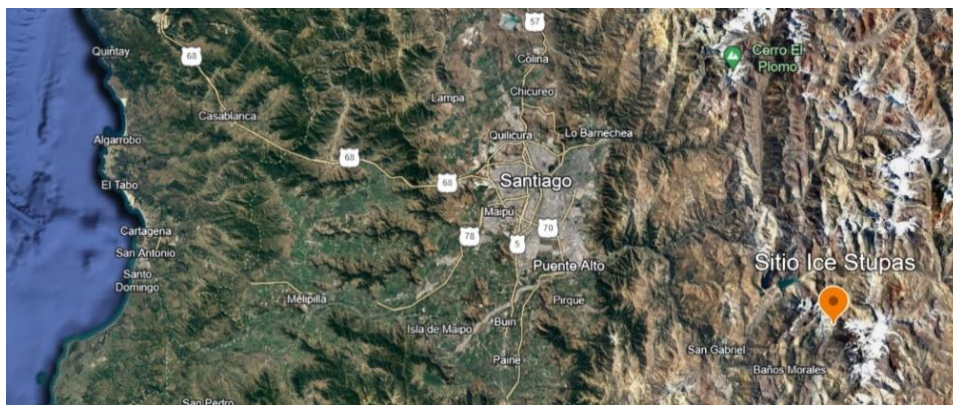


Figura 1 - Geolocalización Ice Stupa de Parque Arenas, Cajón del Maipo, Región Metropolitana

Fuente: Google Earth

La generación de Ice Stupas en Chile se basa en la técnica desarrollada por primera vez en Ladakh, India (Figura 2). Esta técnica permite almacenar agua en forma de Ice Stupa, abasteciendo comunidades afectadas por la crisis hídrica, atribuida al cambio climático, permitiendo el riego de cosechas y la revitalización de ecosistemas.



Figura 2 - Fotografía Ice Stupa de Ladakh

Fuente: Google

Análogamente, Nilus ha conseguido superar limitaciones y dificultades en ámbitos operativos y logísticos, permitiendo desarrollar la técnica de Ladakh en Chile, logrando la generación de Ice Stupas en la Cordillera de los Andes (Figura 3). Respecto a las dificultades que Nilus ha sobrepasado, se hace hincapié en la complejidad de implementar esta técnica en Chile, debido a que cada Ice Stupa requiere cumplir 4 condiciones críticas para su funcionamiento: accesibilidad de agua en altura, capacidad de almacenamiento de agua, condiciones climáticas y condiciones geográficas específicas.



Figura 3 - Fotografía Ice Stupa en Parque Arenas, Cajón del Maipo, Chile

Fuente: Empresa Nilus

Funcionamiento del Sistema Generador de Ice Stupas Tradicional

Nilus estudió y seleccionó lugares para utilizar la técnica que permite la construcción de un sistema generador de Ice Stupas en Chile. En su inicio, el sistema de generación tradicional considera el almacenamiento de 1 [m³] de agua aproximadamente, permitiendo alimentar el sistema de forma continua y mantener una presión de entrada del sistema constante. La segunda parte del sistema considera cañerías de 300 [m] de longitud que transportan el fluido, a través de una caída de agua de 40-50 [m] y un caudal de 4-6 [l/s] desde el almacenamiento en dirección al Ice Stupa a generar. El sistema en su etapa final atomiza el agua mediante un aspersor y posibilita el congelamiento del fluido (en condición de gotas), solamente en condiciones climáticas específicas, creando una superficie cónica y permitiendo la formación de una estructura de hielo en forma de Ice Stupa (Figura 4).



Figura 4 - Funcionamiento de Ice Stupa por método tradicional

Fuente: Elaboración Propia

Las condiciones de congelamiento específicas suceden mayoritariamente en la noche, alrededor de 9 horas al día, cuando las temperaturas son cercanas a los 0°C y existe una radiación solar baja o nula. Por lo anterior, en la etapa final de funcionamiento de cada Ice Stupa existe un sistema automatizado que permite controlar el crecimiento y formación de los Ice Stupas (Figura 5). El funcionamiento del sistema automatizado tiene como objetivo controlar en qué momento del día se generan los Ice Stupa. En el caso que las condiciones ambientales son acordes a las condiciones de congelamiento, el sistema automatizado direcciona el flujo de agua en dirección al aspersor permitiendo el crecimiento del Ice Stupa. Caso contrario, cuando las condiciones ambientales no son favorables para congelar (15 horas al día aproximadamente), el flujo de agua se direcciona hacia el ambiente.

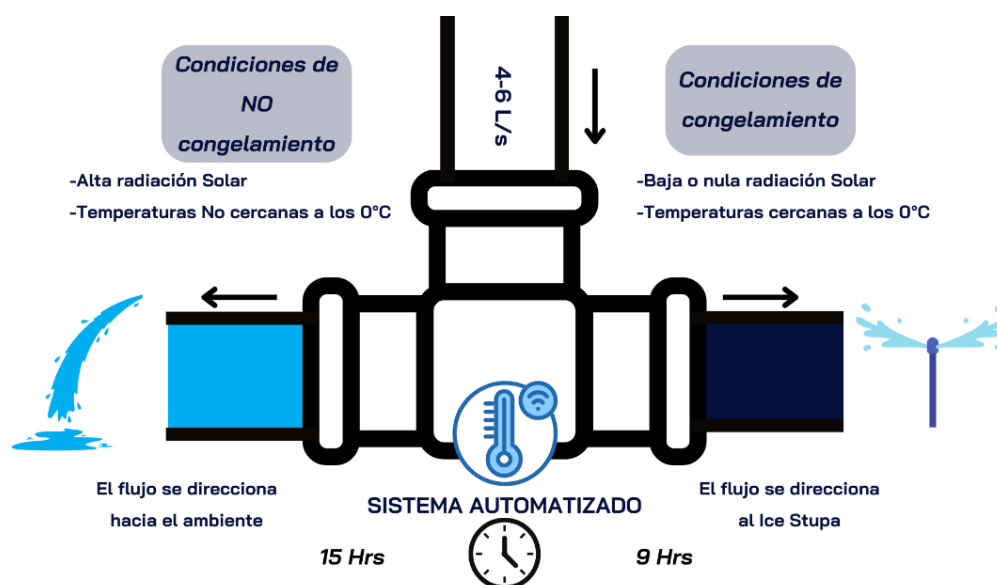


Figura 5 - Funcionamiento Sistema automatizado

Fuente: Elaboración Propia

Estudios recientes de Balasubramanian et al. (2022) en conjunto con Suiza, Himalaya y Chile concluyeron que, para mejorar la eficiencia del crecimiento de los Ice Stupas en periodos de congelamiento (9 horas al día), se recomienda utilizar solo el 25% del caudal total de agua para atomizar. Considerando lo anterior, Nilus no considera realizar un cambio en la construcción de la estructura de generación, ya que durante el desarrollo de los Ice Stupa se han solucionado diversos problemas técnicos que han permitido un funcionamiento constante del sistema y la generación exitosa de Ice Stupas. En particular, Nilus ha logrado controlar el congelamiento de tuberías, mantener la presión del sistema y el funcionamiento continuo del estanque de 1 m^3 de agua en la Cordillera de los Andes.

En base a lo anterior, y considerando que la implementación del sistema de generación de Ice Stupa se debe llevar a cabo en ubicaciones específicas que cumplan las cuatro condiciones críticas previamente señaladas, es que los esfuerzos deben centrarse en evaluar los costos logísticos, operacionales y de materiales necesarios para la construcción y funcionamiento del sistema y entenderlos como factores claves a la hora de planear la construcción masiva de Ice Stupas. Consecuentemente, por

el impacto que genera la construcción del Parque Hídrico con 50 Ice Stupas, con sus respectivos sistemas de generación por el método tradicional, es que Nilus postula probar una nueva técnica de generación, desafiando la construcción tradicional de Ice Stupas mediante la implementación de un “Ice Stupa Hermano”.

Esta nueva técnica requiere la instalación de una bomba de 1 Hp (560 [W]), que aproveche el flujo de agua no utilizada en periodos de congelamiento, **esto corresponde al 75% del flujo total utilizado en este periodo** (9 horas). Lo anterior, se comprende como el crecimiento de un Ice Stupa desde un sistema ya existente. En términos generales significa disminuir a la mitad los impactos generados por la construcción de cada sistema. El desafío propio de la utilización de bombas en la cordillera recae en la **necesidad energética**, concretamente, en el desafío que significa llevar energía eléctrica a 3000 metros de altura y las condiciones ambientales extremas de la cordillera que pudiesen afectar una posible línea de alimentación eléctrica. Es por lo anterior, que se visualiza la **oportunidad de obtener energía desde el flujo de agua, en los momentos en que el sistema automatizado lo dirige al ambiente en periodos de no congelamiento (15 horas al día), permitiendo alimentar una bomba de 1 Hp durante 9 horas al día**. Esta oportunidad da como resultado la generación de un Ice Stupa hermano basado en un sistema tradicional ya existente (Figura 6).

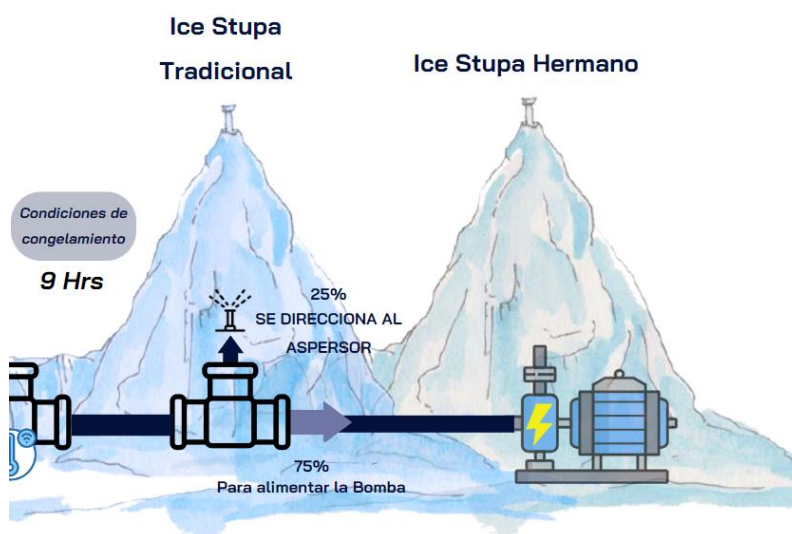


Figura 6 - Funcionamiento Ice Stupa Hermano

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de las **medidas cuantitativas** se destaca la capacidad de generar 560 [W] de potencia, y como consecuencia, la capacidad de almacenar 5.040 [KWh] que permiten alimentar una bomba de 1 HP durante 9 horas al día (periodo del día en que las condiciones son ideales para generar Ice Stupas).

Las **medidas cualitativas** son el conocimiento de la integración de un sistema energético renovable que aprovecha el flujo de agua que circula a través de una tubería. Además, estas medidas consideran abordar la implementación de “Ice Stupas Hermanos”, impulsando la recuperación de glaciares y la generación de vegetación para reducir CO₂.

OBJETIVOS

Objetivo general S.M.A.R.T.

Diseñar un sistema energético de 560 Watts, que alimente una bomba que permita el funcionamiento del aspersor generador de Ice Stupas Hermanos durante 9 horas al día, en un plazo de 3 meses.

Objetivos Específicos

1. Identificar y seleccionar tecnologías de generación de energía limpia
2. Diseñar el sistema de generación de energía en detalle en base a las condiciones de borde definidas por el proyecto
3. Evaluar y formular la implementación del sistema de generación de energía en términos económicos, operativos y medioambientales
4. Desarrollar un plan de implementación del sistema energético en sitio.

ESTADO DEL ARTE

Dado que el propósito del proyecto es generar energía, utilizando el flujo de agua que circula por una tubería donde no hay posibilidad de conectarse a una red eléctrica, debido a condiciones climáticas y geográficas extremas, se identificaron las siguientes soluciones de la literatura relevantes para la selección de alternativas de solución:

La implementación de sistemas energéticos hidroeléctricos depende fundamentalmente de diversos aspectos estratégicos, tales como el diseño, la operación y, posteriormente el mantenimiento del sistema. Sin embargo, también se deben considerar y agregar los aspectos sociales y medioambientales asociados a la construcción de estos dispositivos como parte integral de los aspectos estratégicos de la generación hidroeléctrica. Este enfoque se traduce en abastecer de energía a sectores que carecen de acceso a la matriz eléctrica, lo que a su vez contribuye a mejorar la calidad de vida de las comunidades aledañas (*Murni et al. 2012*). Por lo tanto, es crucial tener en cuenta el impacto social y ambiental en el ecosistema asociado a la implementación de esta tecnología en sectores rurales.

La generación hidroeléctrica es la tecnología renovable mayormente utilizada para generar energía en países con ecosistemas fríos, tales como Noruega y Finlandia. Estos países ubicados en lugares con una baja radiación solar y lugares que no permiten la generación de energía eólica han demostrado que la eficiencia de tecnología hidroeléctrica es la clave para generar energía en estos ecosistemas, representando en algunos países el 99% de la matriz energética (*Gebre et al. 2013*). Por lo tanto, se postula como alternativa viable, según las condiciones climáticas de la cordillera, utilizar este tipo de generación renovable.

En la actualidad, los avances tecnológicos han permitido aumentar la factibilidad y eficiencia de la generación energética a través de la micro generación hidroeléctrica. Con esto, se valida la consideración de esta tecnología como alternativa viable para sistemas menores o iguales a 1 [KW] de potencia, especialmente aquellos sistemas que operen Off Grid (desconectados de la red eléctrica) (*Phitaksurachai et al. 2017*). Estos avances permiten lograr eficiencias mayores al 80%, prescindiendo de la necesidad de grandes saltos de caída de agua (mayores a 30 [m]) o un caudal mayor a 0,5 [m³/s]. En consecuencia, la micro generación hidroeléctrica emerge como una solución práctica, destacando la viabilidad de esta tecnología en sistemas energéticos de microescala.

La mayoría de las alternativas de tecnologías hidroeléctricas recaen en la utilización de un flujo de agua que transporta un río o un canal. Actualmente, se han realizado investigaciones acerca del potencial hidroeléctrico utilizable en la caída de agua de los edificios y en las matrices que distribuyen el flujo de agua en las ciudades o comunidades pequeñas. Estas permiten producir energía mediante el aprovechamiento del flujo de agua utilizando dispositivos de micro generación hidroeléctrica en las tuberías (*Hamlehdar et al. 2022*). Lo anterior permite validar el aprovechamiento del flujo de agua que circula en las tuberías con este tipo de tecnología.

ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Dentro de las alternativas de solución se descartaron las otras energías renovables (solar y eólica) debido a que sus condiciones de funcionamiento no utilizan un flujo de agua. Tampoco se considera la utilización de otras fuentes energéticas tradicionales (combustibles fósiles), debido a que no se alinean con el propósito ambiental de Nilus.

En base a la revisión del estado del arte, **la generación hidroeléctrica** surgió como alternativa adecuada para la generación energética. Concretamente por la capacidad de aprovechar la energía que transporta el flujo de agua y por la adaptabilidad de este tipo de tecnología renovable frente a climas con bajas temperaturas. Este tipo de tecnología se desarrolla en diversos tamaños y aplicaciones que varían según la energía necesaria o la misma capacidad de generación, adaptándose según las condiciones ambientales específicas de cada proyecto. En términos generales, la generación hidroeléctrica necesita un dispositivo mecánico que sea capaz de transformar la energía transportada por el flujo del agua en energía mecánica rotacional, lo que se logra mediante la utilización de turbinas.

Por lo anterior, las alternativas de solución del proyecto se acotan a la correcta selección de las **turbinas hidroeléctricas de micro generación** (estos dispositivos no superan la generación de potencia hidroeléctrica mayor a 10 [KW]). Este enfoque permite el diseño y aprovechamiento de las características del flujo de agua impuestas por el sistema, que para el caso de los Ice Stupas, presenta una caída de agua de **40 [m]** y un caudal entre **4-6 [l/s]** (equivalente a **0,004-0,006 [m³/s]**).

Se realizaron dos análisis para la selección de la turbina de micro generación hidroeléctrica más adecuada. En primer lugar, se recurrió al “Ábaco de selección de turbinas”, con los criterios anteriormente descritos (para más detalle consultar el Anexo N°1), donde no se pudo representar con precisión el punto de selección en el espectro visible del Ábaco debido a las características propias del flujo. De todas formas, se utilizó como guía inicial para la identificación de 3 alternativas de turbinas posibles: Turgo (Figura 7), Pelton (Figura 8) y Banki (Figura 9).



Figura 7 - Alternativa de solución 1: Turbina Turgo

Fuente: Manual de diseño de proyectos Micro Hidroeléctricos



Figura 8 - Alternativa de solución 2: Turbina Pelton

Fuente: Manual de diseño de proyectos Micro Hidroeléctricos.



Figura 9 – Alternativa de solución 3: Turbina Banki.

Fuente: Manual de diseño de proyectos Micro Hidroeléctricos

En segundo lugar, se realizó una matriz de selección que permitió comparar características relevantes de las turbinas seleccionadas. Dentro de un estudio entregado por Gobierno de Chile, contenido en el “Manual de diseño de proyectos Micro Hidroeléctricos”, posibilita la clasificación de las tres alternativas, seleccionadas anteriormente, en función de la eficiencia, caída de agua y el caudal (Funcional), como se muestra en la Tabla 1.

	Eficiencia	Caída de Agua	Caudal (Funcional)
Turbina Turgo	70-80%	25-250m	Bajo - Moderado
Turbina Pelton	80-90%	Mayores o iguales a 30m	Bajo
Turbina Banki	50-70%	3- 200m	Bajo - Moderado

Tabla 1 - Eficiencia, caída de agua y caudal funcional entregado

Fuente: Manual de diseño de proyectos Micro Hidroeléctricos de riego en Chile

Comparando las alternativas de solución, se seleccionó la turbina Pelton como alternativa más adecuada, principalmente por su mayor eficiencia, con un rango entre 80% y 90%, destacando entre las tres alternativas. Además, opera eficientemente con caudales bajos de agua, lo que se traduce en una mayor posibilidad de alcanzar una alta eficiencia en las condiciones de borde del proyecto. Entonces, por la combinación de alta eficiencia y capacidad de operar en condiciones de caída de agua adecuadas al proyecto, convierte la turbina Pelton como la alternativa de solución ideal (para más detalle consultar el Anexo N°1).

Con esta información es posible calcular la potencia hidroeléctrica bajo las mismas condiciones límites del proyecto y validar la generación de potencia de una turbina hidroeléctrica mediante la Fórmula 1, que se visualiza a continuación:

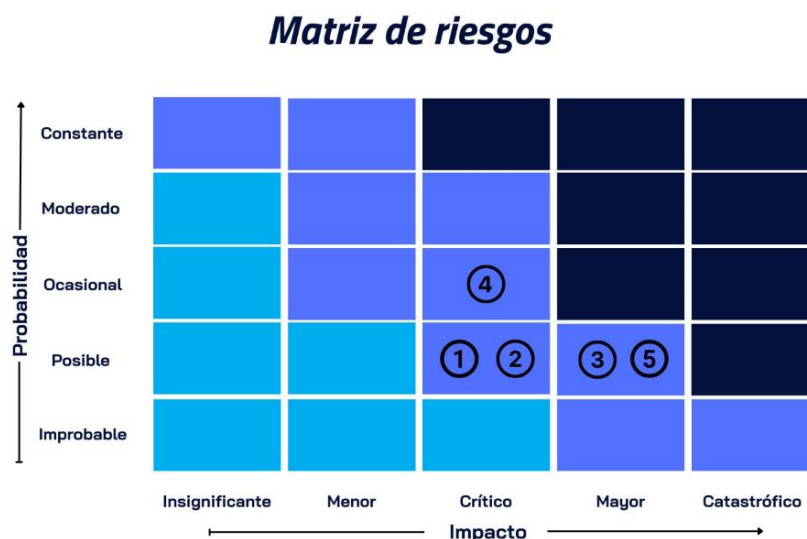
$$Potencia\ Hidroeléctrica = g * \rho * H * Q * \eta$$

Fórmula 1 - Potencia Hidroeléctrica

Donde g es la aceleración de gravedad ($9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$), ρ es la densidad del agua ($1.000 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$), H la altura de salto (40 [m]), Q el caudal ($0,004 \text{ [m}^3\text{/s]}$) y η la eficiencia media de una turbina Pelton (85%). Con estos valores es posible obtener una potencia hidroeléctrica total de **1334,16 [W]**. Por tanto, desde un punto de vista teórico, se valida la opción de colocar una turbina hidroeléctrica, considerando un caudal de $0,004 \text{ [m}^3\text{/s]}$ debido a que es el caso del Ice Stupa con menor caudal de agua, es decir, que la potencia hidroeléctrica determinada es la mínima utilizable por cada sistema.

Matriz de riesgos

La Matriz de riesgos exhibe la distribución de los riesgos de manera escalonada en la Matriz 1, donde la probabilidad experimenta un aumento del 20% en cada etapa. Se establece como constante la presencia de una falla que podría ocurrir en casi el 100% del tiempo, mientras que su ocurrencia es improbable, es decir, cerca del 0% del tiempo. Los impactos varían desde efectos insignificantes hasta eventos catastróficos que podrían afectar el desarrollo e implementación del proyecto.



Matriz 1 – Matriz de riesgos Probabilidad x Impacto

Fuente: Elaboración Propia

Cada riesgo tiene asociada una mitigación asociada, según su probabilidad de ocurrencia y su impacto en el proyecto, tal como se muestra en la Tabla 2.

Riesgos	Probabilidad	Impacto	Medida de mitigación
Cambios en las regulaciones ambientales durante el transcurso del proyecto, implicando cambios durante el desarrollo del sistema	Posible	Crítico	Revisión permanente de las regulaciones ambientales durante el desarrollo del sistema
Incompatibilidad entre las etapas del sistema durante el desarrollo	Posible	Crítico	Realizar un constante análisis entre las interfases del sistema
Incapacidad para encontrar o identificar la eficiencia de cada etapa, que impida calcular el rendimiento del sistema	Posible	Mayor	Buscar bibliografía que exponga la eficiencia de determinadas etapas en situaciones similares a las del proyecto
Problemas con software de diseño computacional afectando el diseño de las piezas	Ocasional	Crítico	Buscar un software alternativo para el diseño de las piezas
Dificultad para determinar la línea base del beneficio medioambiental del proyecto	Posible	Mayor	Utilizar como línea base proyectos similares (Aprovechar conocimientos realizados en el Himalaya)

Tabla 2 – Riesgos, probabilidad de ocurrencia, impacto en el desarrollo/implementación y su mitigación

Fuente: Elaboración Propia

EVALUACIÓN ECONÓMICA

El análisis económico consideró tres escenarios específicos; el comportamiento actual del proyecto Nilus, el escenario de la construcción del Parque Hídrico de 50 Ice Stupas con el método tradicional y finalmente el escenario de la creación del Parque Hídrico con 25 Ice Stupas con el método tradicional y los otros 25 Ice Stupas Hermanos. Para realizar lo anterior, los supuestos fundamentales considerados para el análisis se visualizan en la Tabla 3.

Supuestos para Análisis	Valores	Detalle
Almacenamiento máximo de Ice Stupa	20.000 Litros	Por cada Ice Stupa
Inversión Inicial por sistema Ice Stupa	\$ -15.000 CLP	Sólo al momento de construir el sistema
Costo mantención Ice Stupa al mes	\$ -9.000 CLP	Sólo durante etapas de crecimiento
Inversión en Sistema Automatizado	\$ -3.000 CLP	Sólo al momento de construir el sistema
Tasa de descuento StartUps	15%	La inversión en emprendimientos tecnológicos incluye una tasa de descuento mayor.
Beneficio por litro almacenado	\$ 1 CLP	Beneficio por Cada Litro Almacenado por mes

Números referenciales por motivos de confidencialidad

Tabla 3 – Supuestos para el análisis financiero para Ice Stupas

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 3 expone los supuestos necesarios para realizar un análisis de sensibilidad de los dos primeros casos (más adelante se exponen los supuestos de los costos asociados Ice Stupa Hermano en la Tabla 5). Se destaca que los números expuestos en los supuestos son referenciales, específicamente por la confidencialidad de los datos de la empresa; a pesar de esto, los números conservan la misma proporción con los números reales. Además, para poder realizar el análisis en función del tiempo, se considera que los beneficios por cada litro almacenado son de \$1 CLP por mes. Por lo anterior, fue clave conocer la cantidad de agua almacenada mensualmente. Estos datos fueron obtenidos a través de una simulación realizada por Nilus que permitió estimar la cantidad de agua almacenada por un Ice Stupa al mes, además, permitió reconocer si el Ice Stupa está creciendo o se está derritiendo (ver Tabla 4).

Periodo	Cantidad de Ice Stupas	Factor de tamaño	Comportamiento	Momentos Críticos	Litros almacenados
Enero	1	0,5	Derretimiento		10.000.000 Litros
Febrero	1	0,3	Derretimiento		6.000.000 Litros
Marzo	1	0,2	Derretimiento		4.000.000 Litros
Abril	1	0,1	Derretimiento	Nivel mínimo y Construcción Ice Stupas	2.000.000 Litros
Mayo	1	0,3	Crecimiento	Comienzo Crecimiento	6.000.000 Litros
Junio	1	0,5	Crecimiento		10.000.000 Litros
Julio	1	0,8	Crecimiento		16.000.000 Litros
Agosto	1	0,9	Crecimiento		18.000.000 Litros
Septiembre	1	1	Crecimiento	Nivel máximo de almacenamiento	20.000.000 Litros
Octubre	1	1	Crecimiento	Nivel máximo de almacenamiento	20.000.000 Litros
Noviembre	1	0,8	Derretimiento	Comienzo derretimiento	16.000.000 Litros
Diciembre	1	0,7	Derretimiento		14.000.000 Litros

Tabla 4 – Comportamiento y Litros almacenados por cada Ice Stupa

Fuente: Elaboración Propia

Se expone a continuación los supuestos fundamentales relacionados con la construcción de cada Ice Stupa Hermano. Concretamente se muestran los valores de inversión inicial de construcción (materiales y construcción) y un estimado de los costos asociados a la mantención mensual del sistema, de tal forma que sean comparables con los números referenciales expuestos en la Tabla 3.

Supuestos para Análisis	Valores	Detalle
Almacenamiento máximo de Ice Stupa Hermano	20.000 Litros	Por cada Ice Stupa
Inversión Inicial por sistema Ice Stupa Hermano	\$ -5.000 CLP	Sólo al momento de construir el sistema
Costo extra por mantención Ice Stupa Hermano al mes	\$ -3.000 CLP	Sólo durante etapas de crecimiento

Números referenciales por motivos de confidencialidad

Tabla 5 – Supuestos para el análisis financiero para Ice Stupas Hermanos

Fuente: Elaboración Propia

Considerando lo anterior, se obtienen los resultados de rentabilidad para cada escenario:

Escenario	Inversión Inicial	Valor presente Neto (VAN)	Tasa Interna de retorno (TIR)
Caso Actual con 4 Ice Stupas	\$72.000 CLP	\$15.623 CLP	18%
Caso creación Parque Hídrico - 50 Ice Stupas por método tradicional	\$900.000 CLP	\$2.000.000 CLP	17%
Caso creación Parque Hídrico con implementación del proyecto - 25 Ice Stupas por método tradicional y 25 Ice Stupas Hermanos	\$575.000 CLP	\$3.010.000 CLP	37%

Tabla 6 – Resultados Análisis de sensibilidad de los 3 escenarios

Fuente: Elaboración Propia

El análisis económico permitió validar la rentabilidad del proyecto. El último escenario entregó los mejores indicadores de rentabilidad VAN y TIR. Por tanto, se entiende que la conveniencia y beneficios asociados a la implementación del proyecto posibilitan disminuir el costo económico de la construcción del parque hídrico de 50 Ice Stupas de Nilus.

METODOLOGÍAS

La metodología debe ser capaz de satisfacer el desarrollo en el ámbito mecánico e industrial. Para lograr esto, la metodología de “**Proceso de Desarrollo de producto**” de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger surge como una alternativa sólida para enfrentar la oportunidad desde ambas perspectivas.

La metodología considera 6 fases principales, que incluyen entregables específicos por cada fase (ver Figura 10).

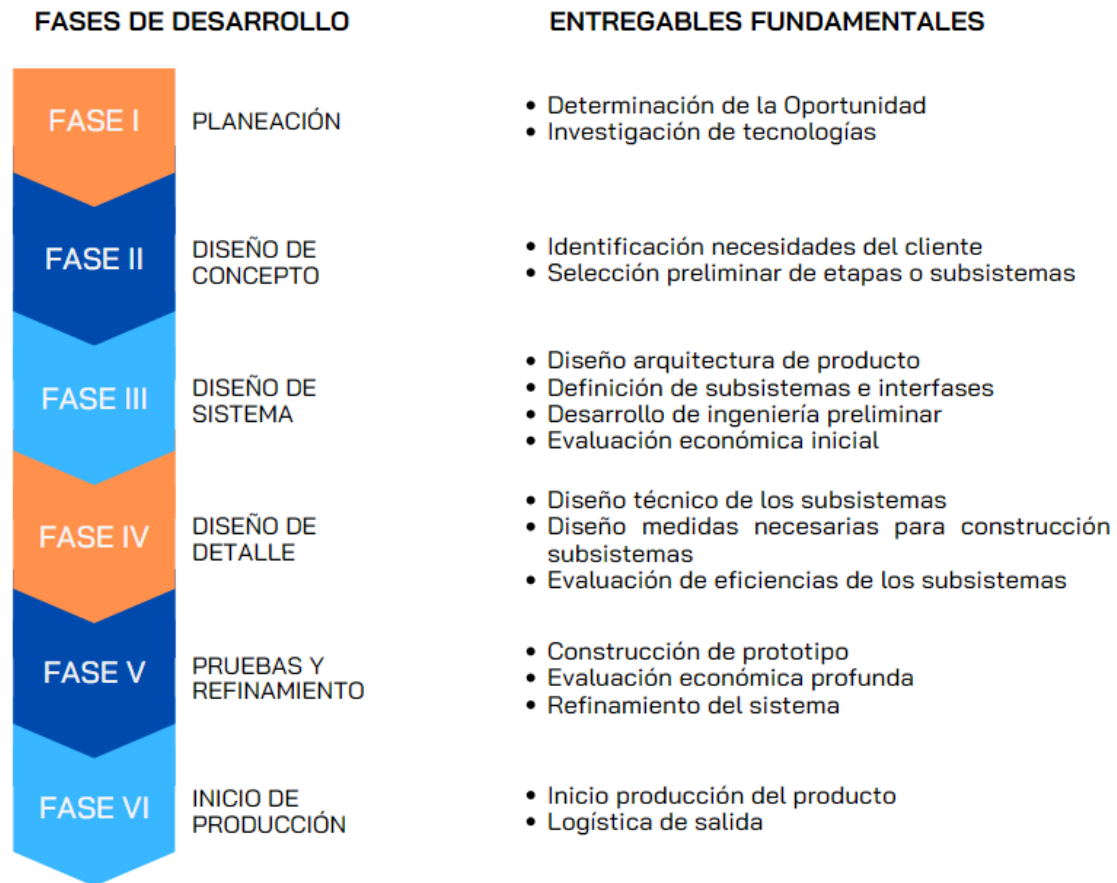


Figura 10 – Secuencia metodología

Fuente: Elaboración Propia

MEDIDAS DE DESEMPEÑO

1. Razón generación energética respecto al mínimo necesario:

$$\text{Razón Generación Energética} = \frac{\text{Potencia Generada (Watts)}}{\text{Potencia mínima necesaria (Watts)}} \times 100$$

Fórmula 2 – Eficiencia de Generación Energética

Mide la eficiencia del diseño del sistema, según la energía que generará el sistema diseñado en comparación con la mínima que necesita generar.

1. Eficiencia de Almacenamiento Energético:

$$\text{Eficiencia de Almacenamiento Energético} = \frac{\text{Energía Almacenada (Wh)}}{\text{Energía necesaria (Wh)}} \times 100$$

Fórmula 3 – Eficiencia de Almacenamiento Energético

Esta medida evalúa la eficiencia con la que el sistema es capaz de almacenar la energía mínima necesaria para alimentar la bomba.

2. Análisis Beneficio/Costo:

$$\text{Beneficio/Costo} = \frac{\text{Beneficios Netos(\$)}}{\text{Costos Totales(\$)}} \times 100$$

Fórmula 4 – Relación beneficio y costo de la implementación

Esta medida evalúa la rentabilidad económica al comparar los beneficios que traería la implementación del sistema generador de Ice Stupas hermanos.

3. Avance de diseño pasantía:

$$\text{Avance de Diseño} = \frac{\text{Nº de hitos de diseño alcanzados}}{\text{Nº total de hitos de diseño planificados}} \times 100$$

Fórmula 5 – Avance de diseño

Esta medida permite medir el progreso y el cumplimiento de las etapas de diseño dentro de los márgenes de tiempo de la pasantía (el último hito de diseño se expone en el plan de implementación que se muestra a continuación).

PLAN DE IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO

En este punto, y considerando los plazos de la pasantía, se indica que plan de implementación para el progreso de la pasantía se extiende hasta “Determinación de la evaluación ambiental y plan de implantación del sistema energético en sitio”.

A continuación, se expone el plan de desarrollo del proyecto para Nilus, abarcando desde el inicio (Planificación) hasta las pruebas del sistema en sitio.

- I. Desarrollo fase de planeación
- II. Desarrollo fase de diseño de concepto
 1. Identificación y aprobación de restricciones de Nilus.
- III. Desarrollo de fase de diseño a nivel sistema
 1. Determinación de elementos, componentes e ingeniería preliminar de la etapa de generación.
 2. Determinación de elementos, componentes e ingeniería preliminar de la etapa de almacenamiento.
 3. Determinación de elementos, componentes e ingeniería preliminar de la etapa de suministro.
 4. Determinación de eficiencias de cada etapa
- IV. Desarrollo de fase de diseño de detalle de la etapa de generación
 1. Aspectos de potencia
 2. Triángulos de velocidades
 3. Elementos de la Turbina Pelton
 4. Determinación de eficiencias de cada etapa
 5. Generación de planos con software de diseño
- V. Determinación de eficiencias en base al diseño y condiciones de borde del proyecto
 1. Eficiencia de la etapa de Generación
 2. Eficiencia de la etapa de Almacenamiento
 3. Eficiencia de la etapa de Suministro
- VI. Determinación de la evaluación ambiental y plan de implantación del sistema energético en sitio (Alcance final pasantía 4 meses)
- VII. Diseño a nivel de detalle de las etapas de almacenamiento y suministro energético
- VIII. Construcción prototipo del sistema
- IX. Pruebas y mejoras
- X. Desarrollo de propiedad intelectual
- XI. Pruebas en sitio

DESARROLLO

Planeación (Fase I)

De acuerdo con la metodología, el desarrollo del proyecto se inicia con la fase de “Planeación”, la que abarca la identificación y establecimiento de la oportunidad. Este entregable se considera completado, ya que la identificación de la oportunidad que origina el proyecto fue reconocida antes de la selección de la metodología.

Luego de una investigación respecto a tecnologías y dispositivos de micro generación hidroeléctrica en el mercado, se indica que no existe un catálogo extenso de esta clase de dispositivos, debido a lo específico de las condiciones de borde del proyecto. Esto produce que el sistema de generación no sea económico ni fácil de adquirir. Lo anterior implica diseñar en forma detallada determinados subsistemas del sistema energético, permitiendo desarrollar de manera personalizada el sistema energético, según las condiciones de borde.

Diseño de Concepto (Fase II)

Esta fase requiere reconocer las necesidades específicas de Nilus para el diseño sistema energético. Se identificaron y confirmaron 6 restricciones de diseño, detallados en la siguiente figura:



Figura 11 – Esquema restricciones de diseño

Fuente: Elaboración Propia

La búsqueda de alternativas para cada etapa se llevará a cabo de forma independiente. Esta estrategia permitió establecer bases y límites para las fases de diseño posteriores.

El sistema debe ser capaz de almacenar energía y utilizarla en los momentos específicos, concretamente durante las 9 Hrs en condiciones de congelamiento. Por lo tanto, en términos generales, el sistema tiene tres etapas: generación, almacenamiento y suministro energético.

Diseño a nivel sistema (Fase III)

La fase de diseño a nivel de sistema comienza con la presentación de un esquema de secuencia y el alcance de desarrollo de cada etapa. La etapa de generación es la única que llegará al diseño de detalle, mientras que las dos restantes llegarán hasta la fase de diseño de sistema (ver Figura 12). Esta fase incluye la determinación del dimensionamiento de las etapas, el desarrollo de la ingeniería básica de cada subsistema y la selección preliminar de elementos para cada etapa.

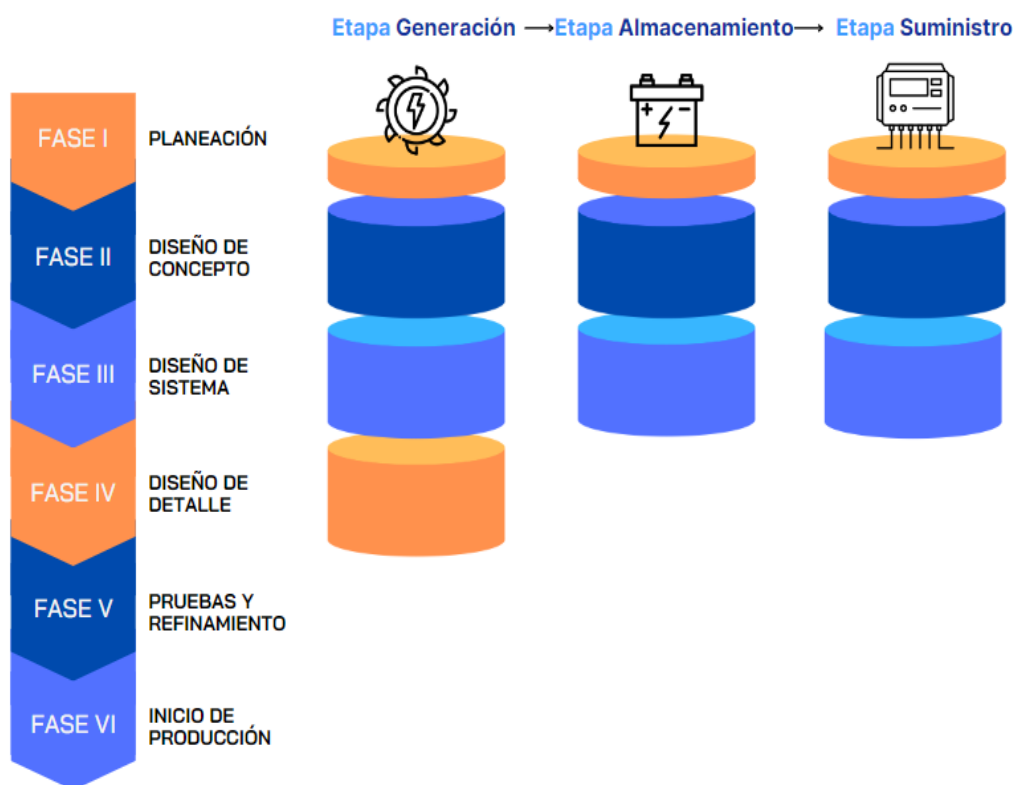


Figura 12 – Esquema de secuencia y alcance de desarrollo del Sistema

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 7 expone el resumen de la selección de componentes e ingeniería básica de la etapa de generación, almacenamiento y suministro energético. Para más detalle revisar Anexo 2.

Características del sistema	Etapas Generación	Etapas Almacenamiento	Etapas Suministro
Descripción	Esta etapa se encarga de generar la energía en periodos de No congelamiento durante 15 horas al día	Esta etapa almacenará energía en baterías de Ion Litio. Este grupo de baterías permitirá abastecer el sistema de la energía necesaria durante las 9 Horas de operación.	Esta etapa permitirá controlar y suministrar la energía en momentos de congelamiento y será capaz de transportar la corriente continua (C.C) en corriente alterna (C.A) y permitir operar a la bomba de 1 Hp.
Eficiencia nominal de la etapa	85%	96%	93%
Elementos	<ul style="list-style-type: none"> Turbina Pelton Generador 	Dos baterías de Ion Litio (500 Ah en total): <ul style="list-style-type: none"> 300 Ah 200 Ah 	<ul style="list-style-type: none"> Controlador de carga y descarga Inversor de corriente de 700 Watts
Tipo de corriente	Corriente Continua (C.C.)	Corriente continua (C.C.)	Corriente continua (C.C.) y corriente alterna (C.A)
Magnitud	1334,2 [W]	5641,5 [Wh]	601,76 [W]

Tabla 7 – Resumen del diseño a nivel sistema de las etapas de generación, almacenamiento y suministro energético

Fuente: Elaboración Propia

El entregable “Análisis económico inicial” se refleja en la sección Evaluación Económica del proyecto.

Diseño de detalle (Fase IV) - Etapa de generación

Se utilizó la metodología “Diseño de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Micro generación” de Juan Elicer Cortez, la cual se caracteriza por desarrollar en detalle los componentes de una turbina Pelton, ajustándose a las condiciones de borde del proyecto. Incluye el diseño de las cucharas, tobera, bulbo, así como el tamaño de la carcasa y su estructura. Se expone un resumen de los elementos necesarios para el diseño de detalle de la turbina Pelton (Tabla 8).

Definición	Valor	Unidad
H (Altura del salto de agua)	40	[m]
Q (Caudal)	0,004	[m ³ /s]
n (Eficiencia)	85%	-
Z (Número de pares de polos del generador)	4	Pares de Polos
f (Frecuencia del generador)	50	[Hz]
g (Aceleración de gravedad)	9,81	[m/s ²]

Tabla 8 – Resumen elementos necesarios para el diseño de la turbina

Fuente: Elaboración Propia

El **proceso de diseño de la Turbina** incluye tres entregables fundamentales: **diseño técnico**, **diseño con software de diseño digital** (Autodesk Inventor Professional) y **confección de planos**. Los elementos y componentes prioritarios se muestran en la siguiente secuencia:

1. Aspectos de potencia
2. Triángulos de velocidades
3. Diseño de la Tobera y Bulbo
4. Diseño de Cucharas
5. Diseño de Rodete

Los últimos tres componentes se visualizan en la Figura 13.

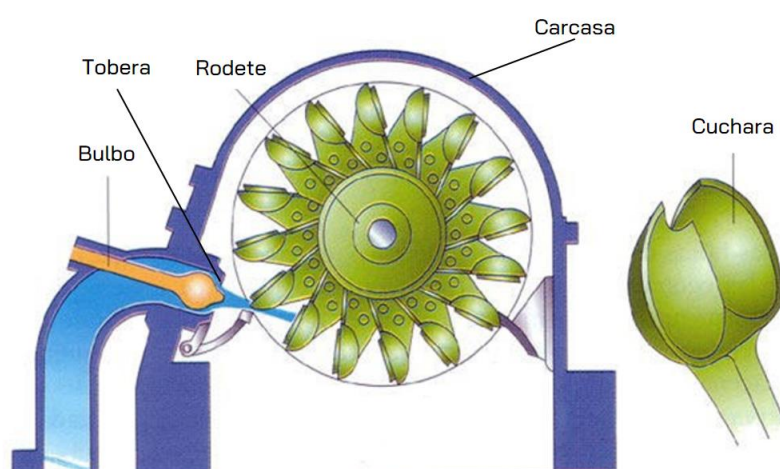


Figura 13 – Turbina Pelton y sus elementos principales

Fuente: Curso turbomáquinas Universidad Adolfo Ibáñez

La carcasa y elementos estructurales no se desarrollarán en el plazo de la pasantía, debido a que no cambian significativamente según las condiciones de borde del sistema, por ende, no se especificará en sus cálculos. Al finalizar el diseño técnico de cada componente considerado, se confeccionó su plano respectivo y posteriormente un plano de ensamble de los conjuntos diseñados.

El generador de potencia fue seleccionado en base a catálogos disponibles en el mercado, adecuándose a los requerimientos de diseño de la etapa de generación. Información detallada de las especificaciones técnicas relevantes del generador de potencia se encuentran en Anexo N°13.

Diseño Técnico de la Turbina

1. Aspectos de Potencia

1.1. Potencia Generada

Se obtuvo, en sección Alternativas de solución, una potencia hidroeléctrica teórica de 1.334,2 [W], considerando el 85% de rendimiento de la turbina (eficiencia promedio de una turbina Pelton).

1.2. Número específico de revoluciones RPM

En Chile, la frecuencia de funcionamiento de los dispositivos electrónicos es de 50 Hz, por lo tanto, y junto con la selección de un generador de 4 pares de polos se utiliza la Fórmula 6 para determinar las RPM (revoluciones por minuto) de la turbina.

$$RPM = \frac{60 * f}{Cantidad\ de\ polos}$$

Fórmula 6 – Fórmula de número específico de revoluciones

De acuerdo a los datos del sistema se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{60 * 50}{4} = 750 [RPM]$$

2. Triángulos de velocidades

2.1. Velocidades en las cucharas

Los triángulos de velocidades permiten determinar la geometría de las cucharas de la Turbina, distinguiendo el punto dónde el chorro de agua hace contacto con la cuchara, la dirección y velocidad con la que el agua sale de la misma. El cálculo de los triángulos de velocidades está dado por la configuración de la cuchara que se visualiza en la Figura 14.

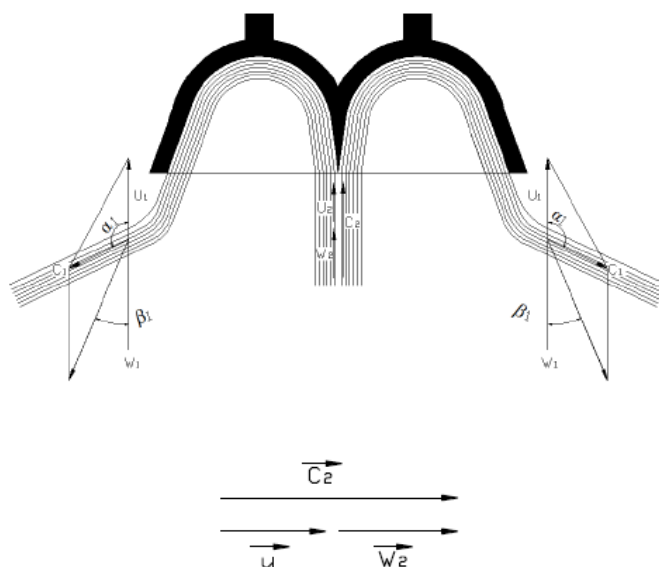


Figura 14 – Diagrama de velocidades en la cuchara

Fuente: “Diseño de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Micro generación” de Juan Elicer Cortez

En la Tabla 9 se exponen los valores de las distintas velocidades en la cuchara. Para más detalle de los respectivos cálculos de las velocidades revisar Anexo 3.

Definición	Valor	Unidad	Detalle
C _i	27,45	[m/s]	Velocidad con la que el chorro de agua impacta la cuchara
C ₂	27,45	[m/s]	Velocidad absoluta a la entrada de la cuchara
U ₂	12,627	[m/s]	Velocidad tangencial a la entrada de la cuchara
W ₂	14,823	[m/s]	Velocidad relativa a la entrada de la cuchara
W ₁	14,526	[m/s]	Velocidad relativa a la salida de la cuchara
C ₁	2,865	[m/s]	Velocidad absoluta a la salida de la cuchara

Tabla 9 – Resumen velocidades en la cuchara

Fuente: Elaboración Propia

3. Tobera y Bulbo

3.1. Diámetro de salida del chorro de agua por la Tobera

Para el diseño de la tobera, la metodología instruye que las dimensiones de este elemento están determinadas en función del diámetro del chorro de agua D_0 . El desarrollo de la determinación de D_0 se encuentra en el Anexo 4.

$$D_0 = 15 \text{ [mm]}$$

En consideración de lo anterior, es posible determinar el diámetro de salida del chorro de agua de la Tobera mediante la Fórmula 8.

$$d = 1,25 * D_0$$

Fórmula 8 – Diámetro de salida de la Tobera

Reemplazando D_0 definido anteriormente:

$$1,25 * 15 = 18,75 \text{ [mm]}$$

$$d = 18,75 \text{ [m]}$$

Con la información del diámetro de salida de la Tobera, es posible determinar sus dimensiones (Tabla 10).

Símbolo	Proporción	Valor	Unidad
a	$1,42 \times d$	0,027	(m)
a0	45	45	Grados
a1	70	70	Grados
dt	$1,1 \times d$	0,021	(m)
x	$0,5 \times d$	0,0094	(m)
dv	$0,58 \times d$	0,0109	(m)
b	$3,25 \times d$	0,061	(m)
d2	$4,5 \times d$	0,084	(m)
l	$6 \times d$	0,1125	(m)
r	$15 \times d$	0,28125	(m)
d1	$2,5 \times d$	0,0469	(m)

Tabla 10 – Dimensiones de la Tobera según el diámetro de salida

Fuente: Elaboración Propia

La Figura 15, obtenida a partir de la literatura, permite ilustrar la ubicación específica de cada dimensión de la Tobera y se considera esencial para el diseño técnico.

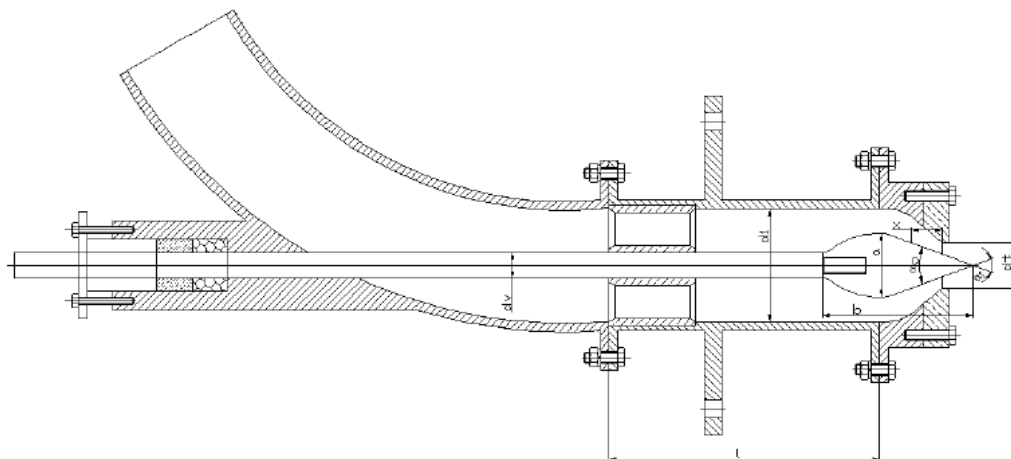


Figura 15 – Ubicación dimensiones para diseño Tobera

Fuente: "Diseño de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Micro generación" de Juan Elicer Cortez

Finalmente, se adjuntan los planos de la Tobera, Bulbo y el ensamblado de estas piezas, diseñados en Autodesk Inventor Professional en los Anexos 5, 6 y 7.

4. Cucharas

4.1. Geometría de la cuchara

En la Tabla 11 se visualizan las dimensiones de la cuchara, según el diámetro de salida de la Tobera y la Figura 16 permite visualizar la posición de las dimensiones determinadas.

Símbolo	Proporción	Valor	Unidad
B	$3 \times d$	0,05625	[m]
L	$2,8 \times d$	0,0525	[m]
D	$0,9 \times d$	70	[m]
f	$0,9 \times d$	0,01687	[m]
M	$1 \times d$	0,01875	[m]
B1	15°	15°	Grados
B2	16°	16°	Grados
l	$1,6 \times d$	0,03	[m]
B3	5°	5°	Grados
B4	13°	13°	Grados

Tabla 11 – Proporciones de las cucharas según el diámetro de salida

Fuente: Elaboración Propia

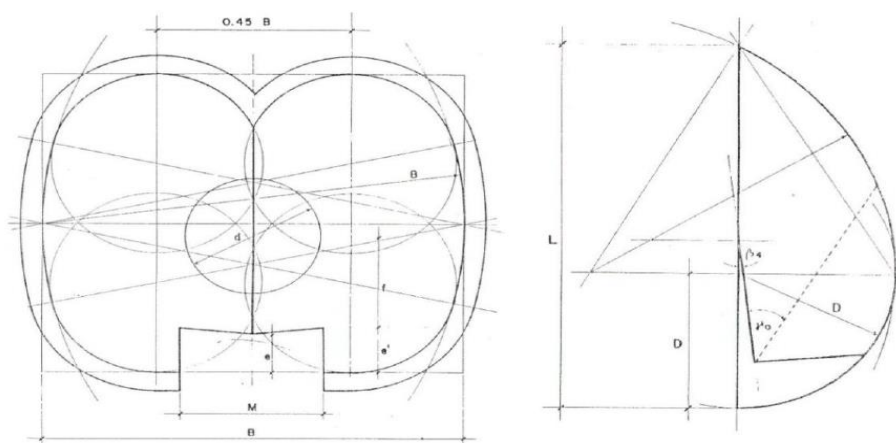


Figura 16 - Ubicación dimensiones para diseño cucharas

Fuente: "Diseño de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Micro generación" de Juan Elicer Cortez

Se adjunta el plano de la cuchara y sus dimensiones en Anexo 8.

5. Rodete

5.1. Elementos del rodete

La Tabla 12 expone un resumen de los elementos y valores determinados para diseñar el rodete de la turbina. Para más detalle revisar Anexo 9.

Definición	Valor	Unidad	Detalle
Dp (Diámetro Pelton)	0,328	[m]	Diámetro principal del rodete. Es el valor principal de construcción del rodete.
Da (Diámetro máximo)	0,3617	[m]	Diámetro máximo de la turbina. Este valor considera la longitud de la cuchara que queda fuera del rodete.
Ns (N° Específico de revoluciones)	13,68	-	Permite comparar y validar la calidad del rodete de la turbina.
Z (Cantidad de cucharas)	21	Cucharas	Cantidad de cucharas que tendrá la turbina.

Tabla 12 – Resumen elementos determinados para diseño del rodete

Fuente: Elaboración Propia

6. Poleas de transmisión

6.1. Tamaños poleas

La relación de tamaños de las poleas es de un 0,25. Es decir, si el diámetro de la polea es de 0,05 [m] del generador, entonces el diámetro de la polea de la Turbina debe ser 0,2 [m]. De esta manera se determinaron las dimensiones de las poleas que distribuirán la velocidad de giro desde la polea de la turbina hacia la polea del generador. Para más detalle de los cálculos de las poleas revisar Anexo 10.

Consideraciones adicionales del diseño de detalle

Finalmente, en términos generales y por recomendación de la literatura, se consideró la estructura de la turbina en bronce (rodete y cucharas) y el resto de la estructura en acero inoxidable. El bronce tiene alta resistencia mecánica y una alta resistencia a la corrosión. Respecto a los otros componentes, se recomienda fabricarlos en acero inoxidable 304, ya que, si bien no tiene una alta resistencia mecánica, tiene una alta resistencia a la corrosión.

DETERMINACIÓN DE EFICIENCIAS POR ETAPA

La Tabla 13 expone un resumen de las eficiencias nominales y las eficiencias simuladas con las condiciones de borde en el sitio de los Ice Stupa. Para más detalle revisar Anexo 11.

Eficiencias	Etapas de generación	Etapas de almacenamiento	Etapas de suministro
Eficiencia Teórica	85%	96%	93%
Eficiencia al simular las condiciones de implementación en sitio	80%	81%	88%

Tabla 13 – Resumen de eficiencias nominales y simuladas en sitio

Fuente: Elaboración Propia

El sistema de generación para Ice Stupa muestra una eficiencia total de la turbina del 80%, determinado por el número específico de revoluciones (Ns). En condiciones de frío extremo, la eficiencia de las baterías de Ion Litio disminuye al 81%. En la etapa de suministro, el controlador de carga y descarga mantiene su eficiencia al 99%, mientras que el inversor de corriente experimenta una leve reducción al 89% en condiciones climáticas adversas, lo que se traduce en una eficiencia de la etapa de un 88%.

Estudio Ambiental de la Implementación

El agua es el elemento fundamental para el funcionamiento de los Ice Stupa y también es de uno de los elementos más relevantes en el contexto ambiental actual. La misma implementación del proyecto permite construir un “Ice Stupa Hermano” desde un Ice Stupa existente. Dicho lo anterior, el análisis ambiental se enfocó en determinar la cantidad de agua reutilizada para el crecimiento de los “Ice Stupa Hermanos”.

En la operación de los sistemas generadores de Ice Stupa, se distingue el desperdicio de un 100% del flujo en momentos de no congelamiento (durante 15 horas al día) y un 75% del flujo en momentos de congelamiento (durante 9 horas al día). El caudal de funcionamiento de los Ice Stupa varía entre 0,004 – 0,006 [m³/s]. Asumiendo un caudal de funcionamiento promedio de 0,005 [m³/s], y considerando la cantidad de agua no utilizada en los periodos de congelamiento (75%), se indica que no se utilizan aproximadamente 3.776 [m³] al mes. Considerando que cada Ice Stupa opera cerca de 6 meses al año, se concluye que hay un desperdicio de 22.600 [m³] de agua por temporada. Esto corresponde a un 28% del agua requerida para el crecimiento de cada Ice Stupa.

La formación de Ice Stupas no produce contaminación o agotamiento del recurso hídrico, por el contrario tiene asociado el beneficio de almacenar recurso hídrico que implica una mayor disponibilidad de agua. Esto es relevante ya que garantiza la implementación del proyecto considerando la eficiencia de la gestión del recurso hídrico en la región (Firth, J. L., .2015). Considerando la construcción del parque hídrico de 50 Ice Stupas (25 Ice Stupas con sistemas tradicionales y 25 Ice Stupas Hermanos con bomba), implica que 25 Ice Stupas utilizan el 28% del agua que anteriormente no se aprovechaba durante periodos de congelamiento, permitiendo aumentar en 565.000 [m³] el recurso hídrico de la región.

Plan de Implementación del Sistema Energético

El plan de implementación tiene como objetivo ordenar y presentar una estrategia que permita transportar de manera eficiente las piezas necesarias para ensamblar el sistema en sitio, minimizando los costos asociados al transporte de las piezas. Es importante comprender que el montaje se realizará a 3.000 metros de altura en la Cordillera de los Andes, escenario que la mayoría de las veces presenta dificultades

debido tanto a las condiciones del terreno, como también, a las condiciones climáticas extremas. Se indica a continuación las piezas necesarias para la construcción del equipo en terreno:

Elemento	Peso	Costo Variable	Etapas del Sistema
Estructura Turbina	16 Kg	\$48.000 CLP	Generación
Rodete y cucharas	5 Kg	\$15.000 CLP	Generación
Tornillos y tuercas	5 Kg	\$15.000 CLP	Generación, Almacenamiento y Suministro
Pasador turbina	1 Kg	\$3.000 CLP	Generación
Carcasa	26 Kg	\$78.000 CLP	Generación
Estructura rodamientos	6 Kg	\$18.000 CLP	Generación
Entrada cañería	4 Kg	\$12.000 CLP	Generación
Ajustador y Bulbo	2 Kg	\$6.000 CLP	Generación
Pieza tubería-carcasa	1 Kg	\$3.000 CLP	Generación
Polea Turbina	7 Kg	\$21.000 CLP	Generación
Estructura Generador	4 Kg	\$12.000 CLP	Generación
Generador	30 Kg	\$90.000 CLP	Generación
Batería Ion Litio A	30 Kg	\$90.000 CLP	Almacenamiento
Batería Ion Litio B	30 Kg	\$90.000 CLP	Almacenamiento
Controlador de carga	1 Kg	\$3.000 CLP	Almacenamiento y Suministro
Inversor de corriente	4 Kg	\$12.000 CLP	Suministro

Tabla 14 – Tabla de elementos, pesos, orden y etapas del sistema energético

Fuente: Elaboración Propia

La logística para transportar las piezas al sitio considera un viaje de 3 horas por carretera hasta el Parque Arenas, y desde allí considera una caminata de 5 horas en promedio por caminos cordilleranos hasta llegar al sitio. Esto agrega un costo variable por pieza asociado al peso de cada una. Considerando lo anterior, es relevante restringir el peso a transportar, concretamente porque los elementos son trasladados por el personal a pie. En promedio suben 3 personas por misión con un costo fijo estimado en \$590.000 CLP (Valor real, es decir, no tiene las mismas proporciones que la Evaluación económica). Además, Nilus ha restringido por seguridad el peso por misión a 30 [kg]. Por tanto, el desafío es lograr subir los elementos cumpliendo las restricciones y minimizando el costo asociado a la logística de transporte de las piezas.

Formalmente el problema se modela de la siguiente manera:

Conjuntos:

- i : Conjunto de piezas (1, ..., 16).
- j : Conjunto de ascensos (1, ..., N)

Función Objetivo:

$$\text{mín} \sum_j^N \sum_i^{16} X_{ij} * CV_i + 590.000 \sum_j^N Y_j$$

Variables de decisión:

- $X_{ij}: \begin{cases} 1 & \text{Si subes la pieza } i \text{ en el periodo } j \\ 0 & \text{e. o. c.} \end{cases}$
- $Y_j: \begin{cases} 1 & \text{Si se realiza el ascenso} \\ 0 & \text{e. o. c.} \end{cases}$

Restricciones:

1. Naturaleza de las variables

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j$$

$$Y_j \in \{0,1\} \quad \forall j$$

2. Consistencia de las variables

$$\sum_i^{16} X_{ij} \leq MY_j \quad \forall j$$

3. No repetir piezas

$$\sum_j^N X_{ij} = 1 \quad \forall i$$

4. Restricción de peso de cada ascenso

$$\sum_i^{16} X_{ij} * P_i \leq 30 \quad \forall j$$

Una vez resuelto el problema de optimización, se concluye que se necesitan 6 ascensos con un costo total de \$4.056.000 CLP.

RESULTADOS

Cuantitativos

Los resultados obtenidos en la etapa de generación se detallan en la Tabla 15.

Resultados etapa de generación	Valor
Eficiencia	80%
Potencia Generada	1.255,68 [W]
Potencia mínima necesaria de esta etapa	376,1 [W]
$(\text{Potencia generada} / \text{potencia mínima necesaria}) * 100$	333,6%

Tabla 15 – Resultados cuantitativos etapa de generación

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en la etapa de almacenamiento se detallan en la Tabla 16.

Resultados etapa de almacenamiento	Valor
Eficiencia	81%
Energía almacenada	16.972,86 [Wh]
Energía mínima necesaria de esta etapa	5.641,5 [Wh]
Capacidad máxima de almacenamiento	5.280 [Wh]
$(\text{Energía almacenada} / \text{Energía mínima necesaria}) * 100$	94%

Tabla 16 – Resultados cuantitativos etapa de almacenamiento

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en la etapa de suministro se detallan en la Tabla 17.

Resultados etapa de suministro	Valor
Eficiencia	88%
Potencia suministrada	560 [W]
Cantidad de horas de suministro	8,3 [Horas]
Cantidad de horas mínimas de suministro	9 [Horas]
$(\text{Horas de suministro} / \text{Horas de suministro mínima}) * 100$	92%

Tabla 17 – Resultados cuantitativos etapa de suministro

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se exponen los resultados mediante los KPI's previamente definidos.

1. Razón generación energética respecto al mínimo necesario

$$\text{Razón Generación Energética} = 333\%$$

KPI 1 – Eficiencia de Generación Energética.

La cantidad de potencia supera en más de tres veces el mínimo necesario para el funcionamiento de la bomba de 1 HP.

2. Eficiencia de Almacenamiento Energético

$$\text{Eficiencia de Almacenamiento Energético} = 94\%$$

KPI 2 – Eficiencia de Almacenamiento Energético

Esto permite alimentar la bomba generadora de Ice Stupas durante 8,3 Hrs.

3. Análisis Beneficio/Costo

$$\text{Beneficio/Costo} = 137\%$$

KPI 3 – Relación beneficio y costo de la implementación

Los beneficios sobrepasan los costos en una razón de 1,37 veces, mostrando la rentabilidad de la implementación del proyecto.

4. Avance de diseño pasantía

$$\text{Avance de Diseño} = 100\%$$

KPI 4 – Avance de diseño

Se cumplió un 100% los hitos de diseño establecidos dentro de los márgenes de la pasantía.

Cualitativos

Se exponen los resultados del diseño del sistema energético correspondiente a la etapa de generación ensamblado (Figura 17), el plano en explosión del ensamble de la misma (Figura 18) y el plano del ensamble del rodete (Figura 19).

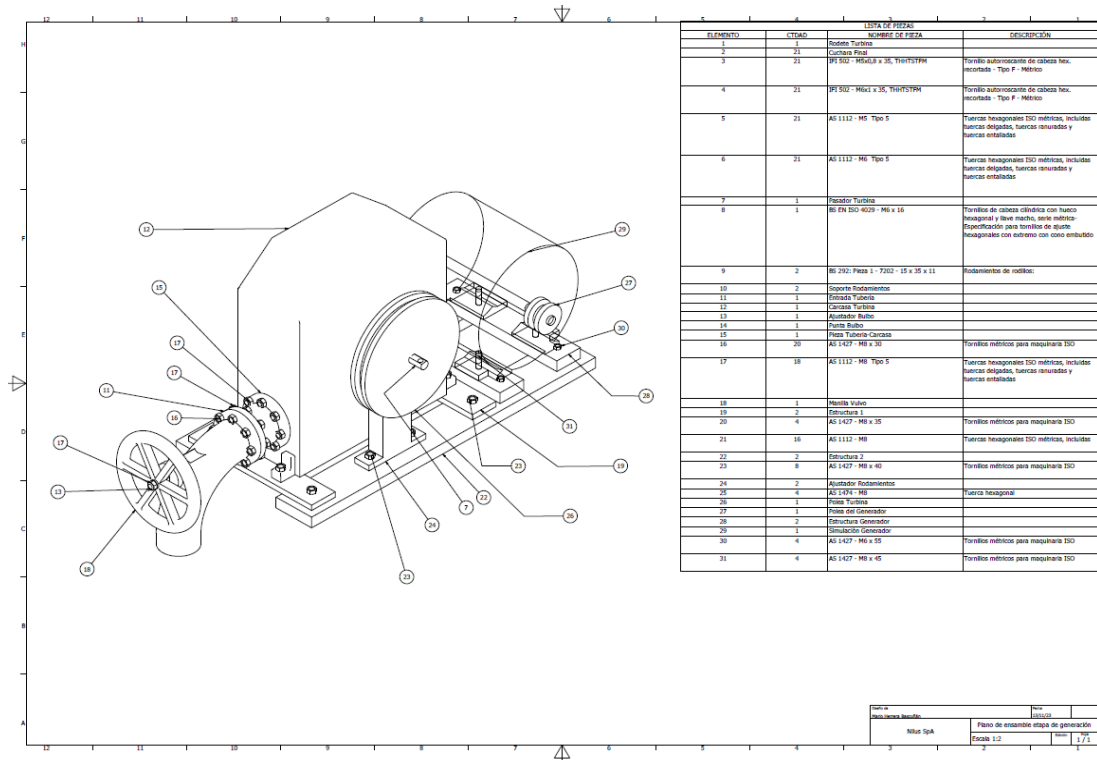


Figura 17 – Plano ensamblaje etapa de generación

Fuente: Elaboración Propia Autodesk Inventor Professional

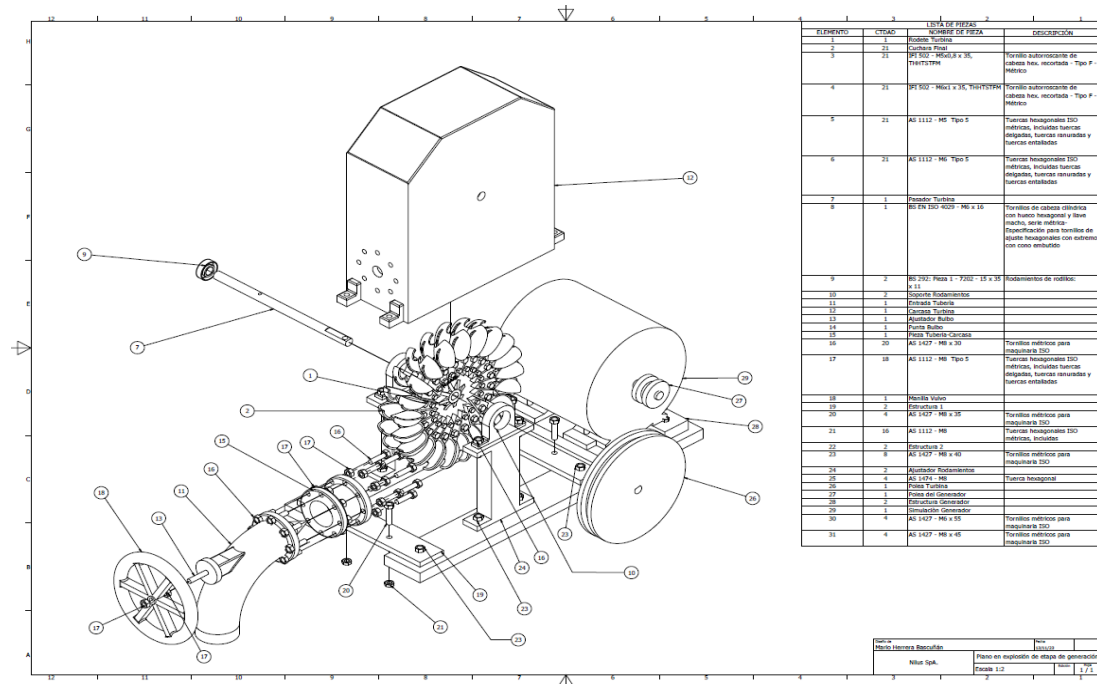


Figura 18 – Plano en explosión ensamblaje etapa de generación

Fuente: Elaboración Propia Autodesk Inventor Professional

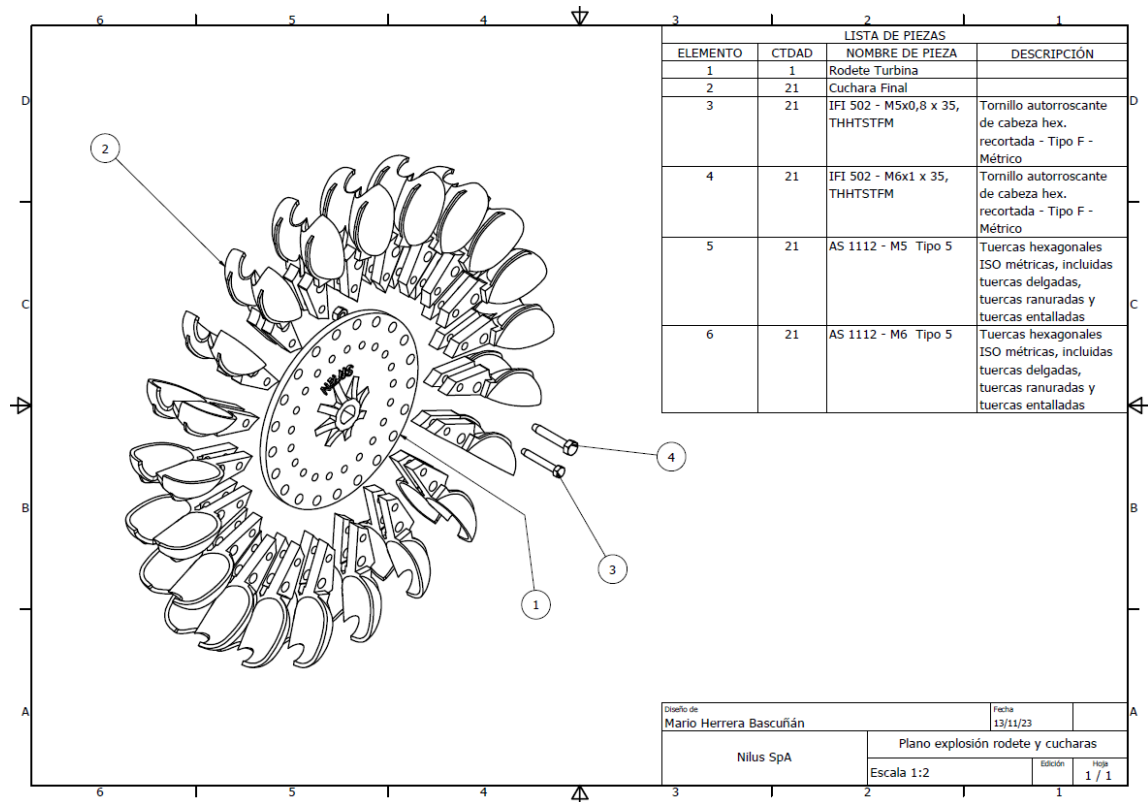


Figura 19 – Plano en explosión ensamble rodete

Fuente: Elaboración Propia Autodesk Inventor Professional

Resultado estudio ambiental de la implementación

Aumento de almacenamiento de agua en un 28% de la totalidad de agua en la operación, lo que se traduce en más de 565.000 m³ del recurso hídrico en la región, equivalente a 170 piscinas olímpicas.

Resultados plan de implementación

Ascenso	Peso Total	Piezas	Costo acumulado
1	30 Kg	12	\$680.000 CLP
2	30 Kg	13	\$1.360.000 CLP
3	30 Kg	14	\$2.040.000 CLP
4	30 Kg	5 y 7	\$2.720.000 CLP
5	30 KG	1, 2, 3 y 11	\$3.400.000 CLP
6	22 Kg	4,6,8,9,10, 15 y 16	\$4.056.000 CLP

Tabla 18 – Resultados del plan de implementación

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Conclusión

Se destaca el cumplimiento exitoso de los objetivos específicos del proyecto, tales como la identificación de alternativas para el desarrollo del sistema de energía, diseño del sistema energético de acuerdo a las condiciones de borde impuestas, evaluación ambiental de la implementación del proyecto y formulación del plan de implementación para el ensamble del sistema energético en el sitio.

El objetivo general del proyecto fue cumplido mayormente en su totalidad al diseñar el sistema energético que permite alimentar la bomba generadora de Ice Stupas Hermanos, la cual operará durante el 94% del tiempo en periodos de congelamiento. Además, en caso de poder almacenar toda la potencia generada, se abriría la posibilidad de alimentar hasta tres Ice Stupas Hermanos utilizando el sistema de un Ice Stupa ya existente.

En cuanto a los indicadores clave de rendimiento (KPI), se concluye que el diseño de la turbina Pelton alcanza una eficiencia total de un 80% en sitio, ubicándose dentro de los márgenes aceptables de la turbina Pelton. Además, la pérdida de eficiencia de la etapa de almacenamiento debido a las bajas temperaturas en sitio (-15°C) implica el funcionamiento de la bomba durante 8,3 horas al día (dentro del periodo de congelamiento de 9 horas).

En relación al desarrollo de las etapas necesarias para el proyecto, se concluye que se llevaron a cabo el 100% las actividades esenciales para el desarrollo integral del mismo.

Como resultado del análisis económico, se confirma que el proyecto es rentable y conveniente para la creación del Parque Hídrico de Nilus. La implementación de los 25 Ice Stupa tradicionales con 25 Ice Stupa hermanos arroja una TIR de 37% y un VAN de \$3.010.000, superior a los otros escenarios evaluados.

Adicionalmente, los resultados del análisis ambiental promueven la implementación del sistema generador de Ice Stupas Hermano, ya que mejora en un 28% la cantidad del recurso hídrico en la región, favoreciendo de manera directa la crisis hídrica que afecta a la región. Asimismo, se concluye que a través del plan de implementación del sistema generador de Ice Stupa es posible transportar de manera eficiente los elementos necesarios para ensamblar el sistema energético en el sitio (6 ascensos).

Finalmente, este proyecto resuelve el problema de requerimiento energético para alimentar las bombas de los Ice Stupas Hermanos y es por esto que Nilus ha decidido invertir en la implementación de esta solución permitiendo la construcción del Parque Hídrico de 50 Ice Stupas.

Recomendaciones

1. Las condiciones climáticas mayormente afectan la eficiencia de las baterías, por lo que se recomienda sobredimensionar la etapa de almacenamiento para aprovechar las 9 horas disponibles bajo las condiciones de congelamiento.
2. Se recomienda diversificar la logística del plan de implementación, considerando vehículos para transporte en alta montaña, con lo cual se facilitaría el traslado de las piezas al sitio.
3. Una vez finalizada la fase de diseño de detalle de todas las etapas, es de vital importancia considerar aislamientos térmicos para todo el sistema, para evitar pérdidas de eficiencia debido a las condiciones ambientales extremas en invierno.
4. Se recomienda planificar la implementación de Ice Stupas en otras ubicaciones con problemas de estrés hídrico, permitiendo aumentar la cantidad del recurso hídrico disponible.
5. Se sugiere la implementación de Ice Stupas sobre glaciares existentes, con el fin de proteger sus superficies, permitiendo detener el proceso de derretimiento acelerado debido al cambio climático.
6. Promover la implementación de “Ice Stupas Hermanos” en otros lugares de construcción de Ice Stupas tradicionales (Himalaya y Suiza).

REFERENCIAS

1. Murni, S., Whale, J., Urmee, T., Davis, J. K., & Harries, D. (2012). The role of micro hydro power systems in remote rural electrification: a case study in the Bawan Valley, Borneo. *Procedia Engineering*, 49, 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.10.127>
2. Phitaksurachai, S., Pan-Aram, R., Sritrakul, N., & Tiaple, Y. (2017). Performance testing of low head small hydro power development in Thailand. *Energy Procedia*, 138, 1140-1146. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.221>
3. Hamlehdar, M., Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Mohammadi, M. (2022). Energy recovery from water distribution networks using micro hydropower: a case study in Iran. *Energy*, 252, 124024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124024>
4. Gebre, S. B., Alfredsen, K., Lia, L., Stickler, M., & Tesaker, E. (2013). Review of Ice effects on hydropower Systems. *Journal of Cold Regions Engineering*, 27(4), 196-222. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cr.1943-5495.0000059](https://doi.org/10.1061/(asce)cr.1943-5495.0000059)
5. Gob.cl. Recuperado el 15 de octubre de 2023, de <https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/Manual-de-Disen%C3%83o-de-Proyectos-Microhidroele%C3%81ctricos-en-Obras-de-Riego.pdf>
6. Lin, Z., Li, D., & Zou, Y. (2023). Energy efficiency of lithium-ion batteries: influential factors and long-term degradation. *Journal of Energy Storage*, 74, 109386. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109386>
7. Ulrich, K. T. (2008). *Diseño y Desarrollo de Productos* (5ta ed.).
8. Firth, J. L. (2015). Water: Our Most Precious Resource.
9. Diseño de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Micro generación" de Juan Elicer Cortez.
10. Zhang, S. S., Xu, K., & Jow, T. R. (2003). The low temperature performance of li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 115(1), 137-140. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(02\)00618-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(02)00618-3)
11. Balasubramanian, S., Hoelzle, M., Lehning, M., Bolibar, J., Wangchuk, S., Oerlemans, J., & Keller, F. (2022). Influence of meteorological conditions on artificial Ice reservoir (Icestupa) evolution. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.771342>

ANEXOS

Anexo N°1 - Selección de turbina

Una vez validada la micro generación hidroeléctrica, el siguiente paso es identificar que turbina se utilizará. Para abordar esta selección, se recurre al “Abaco de selección de turbinas”, una herramienta que se utiliza para identificar las opciones de turbinas adecuadas. Estos criterios de selección son la altura de caída y el caudal de agua disponibles. Lo Ice Stupas consideran una caída de agua de **40 [m]** y un caudal entre 4-6 l/s, (Equivalente a **0,004-0,006 [m³/s]** de agua). No obstante, es importante considerar que las características del flujo no permiten representarlo con precisión en el espectro visible del Abaco de selección. Por tanto, se utilizará el Abaco como guía inicial para identificar las turbinas posibles y posteriormente se realizará un análisis entre las alternativas para poder seleccionar la que mejor se comporte frente a las condiciones del proyecto.

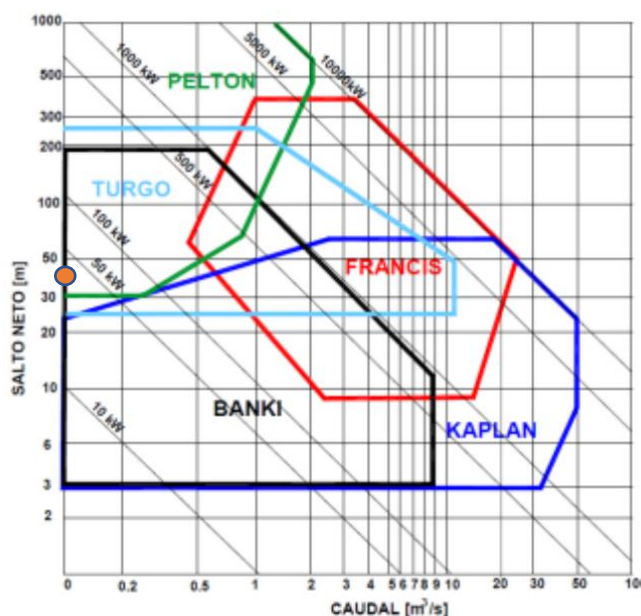


Gráfico 1- Abaco de selección de Turbinas

Dentro de las alternativas posibles, reconocidas en el Ábaco de selección de turbinas, destacan la turbina Turgo, Pelton y Banki. Por tanto, se comprenden que existen tres alternativas para atacar la oportunidad, por lo que se hace indispensable realizar una matriz de características que permitan comparar y evaluar cuál turbina escoger.

Para construir la matriz comparativa, el segundo criterio de selección de turbinas será según las características de funcionalidad de las alternativas y su comportamiento respecto a las características del flujo del sistema. Concretamente se considerará la eficiencia promedio, la caída de agua y el caudal promedio de las tres alternativas.

	Eficiencia	Caída de Agua	Caudal (Funcional)
Turbina Turgo	70-80%	25-250m	Bajo - Moderado
Turbina Pelton	80-90%	Mayores o iguales a 30m	Bajo
Turbina Banki	50-70%	3- 200m	Bajo - Moderado

Tabla 1 – Eficiencia, caída de agua y caudal funcional entregado por Manual de Diseño de proyectos Micro hidroeléctricos de riego en Chile.

El estudio que entrega el Gobierno de Chile, contenido en el “Manual de diseño de proyectos Micro Hidro eléctricos” posibilita la clasificación de las tres alternativas, seleccionadas anteriormente, en función de la eficiencia, caída de agua y el caudal (Funcional), como se muestra en la Tabla 1. La comparación de las alternativas será clave para determinar cuál es la mejor opción para desarrollar en función de las condiciones propias del sistema generador de Ice Stupa.

En primer lugar, en términos de eficiencia, al momento de realizar la comparación entre los tres tipos de turbinas, destaca la turbina Pelton, con eficiencias que oscilan entre el 80% y 90%. Posteriormente la sigue la turbina Turgo, con eficiencias en el rango del 70% y 80%, y finalmente, la turbina Banki, con eficiencias dentro del rango del 50 y 70%.

El segundo criterio de comparación es la caída de agua, aspecto que permite el funcionamiento de la turbina en condiciones idóneas. En este sentido, la turbina Pelton opera mejor justo en alturas mayores o iguales a 30 [m]. Posteriormente, tanto la turbina Turgo como Banki se desempeñan en un rango operativo extenso, desde 25-250 [m] y 3-200 [m] respectivamente.

El último aspecto comparativo de las turbinas corresponde al caudal de funcionamiento. Esta clasificación es en comparación del caudal total aceptable por las turbinas, esto se clasifica según Nivel de caudal bajo, medio y alto. Respecto a este punto, las tres alternativas pueden funcionar con caudales bajos lo que las convierte en candidatas adecuadas en este aspecto.

Anexo N°2 - Desarrollo de fase de diseño a nivel sistema (III)

1. Diseño a nivel sistema de la Etapa de generación

La potencia total que puede desarrollar la etapa de generación, mediante la generación hidroeléctrica, se calculó previamente utilizando la fórmula 1, resultando en una potencia hidroeléctrica teóricamente utilizable de **1334,2 [W]**. Este valor al compararlo con los 560 [W], necesarios para la

operación de la bomba, permite validar la utilización de micro generación hidroeléctrica en la etapa de generación, específicamente mediante una turbina Pelton. Dentro de las restricciones de diseño, se exige aprovechar el máximo del flujo para la generación energética. Es por esto que para determinar la cantidad de potencia que deberá generar como mínimo la etapa de generación, se debe realizar el análisis de manera inversa, comenzando desde la cantidad de potencia específica que necesita la bomba y retroceder etapa por etapa hasta conocer la cantidad de energía que debe generar la Turbina Pelton. Por lo anterior, se justifica empezar con el análisis por la etapa de suministro energético.

Es importante mencionar que la Etapa de generación será la única que llegará a la fase de Diseño en detalle. Esto se debe a que es la etapa encargada de aprovechar al máximo la cantidad de energía que transporta el flujo de agua por la cañería. Esta etapa, en términos generales, está constituida por una Turbina y un generador que estarán conectados por una correa de transmisión, este elemento será capaz de conectar dos poleas y transformar la energía de rotación, proveniente de la Turbina, que posteriormente el generador transformará en energía eléctrica.

2. Diseño a nivel de sistema de la Etapa de suministro

En la etapa de suministro energético, resulta esencial gestionar de manera eficiente la energía almacenada para alimentar la bomba, especialmente considerando que esta opera con corriente alterna (A.C). Es por esto que es crucial comprender cómo se almacenará la energía, la literatura especializada sobre la generación Off-Grid, específicamente *Murni et al. (2012)*, respalda el uso de baterías para almacenar energía en micro generación hidroeléctrica, especialmente debido a la eficiente relación almacenamiento/precio de estos dispositivos. En la misma línea y considerando la elección de baterías para la etapa de almacenamiento, en (Lin et al., 2023) aboga por sustituir las baterías de Acido-Plomo por las de Ion Litio (12 [V]) en este tipo de escenarios, destacando su alta densidad energética, su bajo peso, su eficiencia de carga y descarga. Sobre esta base, la eficiencia nominal de las baterías de Ion Litio tiene el rango de 96%-98% de eficiencia en condiciones normales. Ahora, el tipo de corriente de las baterías es de carácter continuo (C.C.), en comparación con la corriente alterna (A.C.) requerida para ocupar la bomba. Por lo tanto, la etapa de suministro energético debe abordar la conversión de corriente para satisfacer las necesidades específicas de la bomba.

Esta etapa estará configurada con un sistema de control de carga y descarga. Este sistema tiene la función de regular el momento en el cual se suministra la energía almacenada en las baterías. Además, se incorporará un inversor de corriente diseñado para transformar la corriente de 12 [V] (Tensión Baterías) en 220 [V] (Tensión Bomba) con una frecuencia de 50 Hz, transformando la corriente continua (C.C) de las baterías en corriente alterna (A.C). Cabe destacar que tanto el controlador de carga y descarga como el inversor de corriente presentan eficiencias nominales, siendo un 99% y 94%, respectivamente.

Conociendo los valores de eficiencia de la etapa de suministro, es posible calcular la cantidad de potencia necesaria que permita el funcionamiento de la Bomba. Esto permitirá encontrar la potencia que

debe entrar a la etapa de suministro. La bomba necesita de 560 Watts para operar, por lo que se realiza el siguiente cálculo:

$$\frac{560[W]}{0,99 * 0,94} = 601,76 [W]$$

Por lo tanto, la entrada de potencia que necesita la etapa de suministro energético es de **601,76 [W]**. Sobre esta base, calculamos la energía necesaria que deberá ser almacenada por las baterías de Ion Litio.

3. Diseño a nivel sistema de Etapa de Almacenamiento

Dado que la bomba generadora del Ice Stupa Hermano operará durante 9 Horas al día y que anteriormente se justificó la utilización de baterías de Ion Litio (12 [V]), es posible expresar el siguiente cálculo para determinar la cantidad de energía que se necesitará almacenar considerando como base la potencia, anteriormente determinada, que debe salir de la etapa de suministro.

$$601,76 [W] * 9 [hrs] = 5415,84 [Wh]$$

Por tanto, la cantidad nominal de energía que debiese almacenar esta etapa es de 5415,84 [Wh]. Teniendo en cuenta la eficiencia nominal de las baterías de Ion Litio (96% asumiendo el caso menos eficiente) es posible calcular la cantidad de energía que se debiera almacenar en esta etapa:

$$\frac{5415,84 [Wh]}{0,96} = 5.641,5 [Wh]$$

Determinada la cantidad de energía a almacenar, surge la necesidad de calcular el tamaño y cantidad de baterías a utilizar para satisfacer la demanda energética. En esa línea es posible determinar el tamaño y cantidad de baterías con la fórmula 2.

$$Energía [Wh] = Capacidad [Ah] * Voltaje[V]$$

Fórmula 2 – Fórmula de Energía según capacidad y voltaje de la Batería

La capacidad necesaria se comprende de la siguiente manera:

$$Capacidad [Ah] = \frac{Energía [Wh]}{Voltaje [V]} = \frac{5641,5 [Wh]}{12 [V]} = 470,125 Ah$$

Actualmente, en términos económicos y logísticos se imposibilita el acceso a baterías mayores a 300 [Ah], entonces será necesario utilizar dos baterías de Ion Litio. Específicamente una batería de 300 [Ah] y otra de 200 [Ah], lo que entregaría un almacenamiento de energía total de 500 [Ah], permitiendo cubrir de forma completa la cantidad de energía a almacenar. Antes de continuar con el estudio de la etapa de generación, se comenta que en la Figura 9 se encuentra un resumen de lo seleccionado para la etapa de almacenamiento y suministro energético.

Entonces, el sistema tendrá que almacenar como mínimo 5641,5 [Wh] para que la bomba generadora del Ice Stupa hermano pueda trabajar durante 9 horas al día. Para permitir el almacenamiento de energía, la etapa de generación operará durante 15 horas al día, por ende, bajo el siguiente cálculo es posible determinar la potencia mínima generada, durante este periodo, que permita el correcto funcionamiento de la bomba.

$$Potencia [W] = \frac{Energía [Wh]}{Horas [h]} = \frac{5641,5 [Wh]}{15 [h]} = 376,1 [W]$$

Por tanto, la etapa de generación energética debe generar una potencia mínima de 376,1 [W].

Anexo N°3 – Primera parte desarrollo de fase de diseño a nivel de detalle etapa de generación (IV)

2. Triángulos de velocidades

Para poder calcular los elementos de los triángulos de velocidades, es necesario conocer el coeficiente de velocidad, denominado como K_c , que oscila entre 0,97 y 0,98. Para el desarrollo del proyecto, se utilizará el valor de 0,98, respaldado por la literatura que sugiere este valor en turbinas de micro generación. Con K_c seleccionado y la altura H del sistema, es posible obtener C_i . Este valor corresponde a la velocidad con la que el chorro impacta a la cuchara, esta velocidad se obtiene utilizando la fórmula 5.

$$C_i = K_c * \sqrt{2 * g * H}$$

Fórmula 5 – Velocidad absoluta a la entrada de la cuchara

Reemplazando con los valores del sistema:

$$0,98 * \sqrt{2 * 9,81 * 40} = 27,45 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$C_i = 27,45 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Antes de continuar, es esencial destacar la siguiente relación:

$$C_i = C_2$$

Esta relación da a comprender que C_i es igual a la velocidad absoluta C_2 con la que el chorro de agua golpea la cuchara.

2.2. Velocidad tangencial

Según se muestra en la Figura 11, la relación de la velocidad absoluta revela que C_2 es la suma de la velocidad U_2 más la velocidad W_2 . Para determinar el valor de la velocidad tangencial U_2 , es necesario conocer el valor del coeficiente de velocidad tangencial K_u , el cual tiene un valor específico según la

literatura, siendo igual a 0,46 para las Turbinas Pelton. Además, se debe conocer el ángulo α_2 , que corresponde al formado entre los componentes de velocidad tangencial U_2 y la velocidad absoluta C_2 , que tiene valor de 0° en las Turbinas Pelton. El cálculo de la velocidad tangencial U_2 se obtiene mediante la Fórmula 6.

$$U_2 = K_u * C_2 * \cos(\alpha_2)$$

Fórmula 6 – Velocidad tangencial a la entrada de la cuchara

Reemplazando con los valores obtenidos anteriormente

$$0,46 * 27,45 * \cos(0) = 12,627 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$U_2 = 12,627 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Con la velocidad absoluta y la velocidad relativa, es posible proceder a determinar la velocidad relativa W_2 . En términos generales, si el desarrollo se ha realizado de forma correcta el valor determinado de W_2 más el valor de U_2 , debiese ser equivalente a C_2 . El valor de la velocidad relativa se obtiene mediante la Fórmula 7, expuesta a continuación.

$$W_2 = C_2 * (1 - K_u)$$

Fórmula 7 – Velocidad relativa a la entrada de la cuchara

Reemplazando con los valores anteriores:

$$27,45 * (1 - 0,46) = 14,823 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$W_2 = 14,823 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Comprobando la suma de la velocidad tangencial más la velocidad relativa:

$$W_2 + U_2 = C_2$$

$$14,823 + 12,627 = 27,45 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Este procedimiento confirma la validez de los cálculos realizados y asegura coherencia para continuar con los cálculos de las distintas velocidades del agua en la cuchara.

Continuando con la determinación de las velocidades existentes en la cuchara, es hora de calcular las velocidades con las que el agua sale de la cuchara. Para el cálculo de estas velocidades se debe considerar el coeficiente de velocidad relativa K_f , que expone la pérdida de velocidad del agua por el mismo

roce con la cuchara, la literatura estima este valor en 0,98. Con esta información es posible calcular la velocidad relativa W_1 , la que se obtiene mediante la Fórmula 8.

$$W_1 = Kf * C_2 * (1 - Ku)$$

Fórmula 8 – Velocidad relativa a la salida de la cuchara

Reemplazando con los valores del sistema:

$$0,98 * 27,45 * (1 - 0,46) = 14,526 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$W_1 = 14,526 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Junto a lo anterior, es posible determinar la velocidad absoluta de salida C_1 . Antes es necesario mencionar que el valor del ángulo β_1 en Turbinas Pelton es igual a 10° . Con lo anterior, es posible determinar la velocidad absoluta de salida mediante la Fórmula 9, expuesta a continuación:

$$C_1 = C_2 * \sqrt{Ku^2 + Kf^2 * (1 - Ku)^2 - 2 * Ku * Kf * (1 - Ku) * \cos(\beta_1)}$$

Fórmula 9 – Velocidad absoluta a la salida de la cuchara

Reemplazando con los datos del proyecto:

$$27,45 * \sqrt{0,46^2 + 0,98^2 * (0,54)^2 - 2 * 0,46 * 0,98 * (0,54) * \cos(10^\circ)} = 2,865 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$C_1 = 2,865 \left[\frac{m}{s} \right]$$

De esta manera, se ha logrado determinar en forma específica, y para las condiciones del proyecto, los triángulos de velocidades de la Turbina Pelton. Esto proporciona un entendimiento del claro del comportamiento del flujo del agua al momento de impactar con la cuchara de la turbina Pelton.

Anexo N°4: Determinación de medidas técnicas Bulbo y Tobera

3.1. Diámetro de salida del flujo por la Tobera

Para el diseño de la tobera, la metodología instruye que las dimensiones de este elemento están determinadas en función del diámetro del chorro de agua D_0 . En este caso, la literatura sugiere mantener el valor de K_c de 0,98. Con lo anterior, es posible determinar el diámetro del chorro que se mediante la Fórmula 7, expuesta a continuación.

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 * Q}{(\pi * K_c * \sqrt{2 * g * H})}}$$

Fórmula 7 – Diámetro mínimo del Chorro de agua

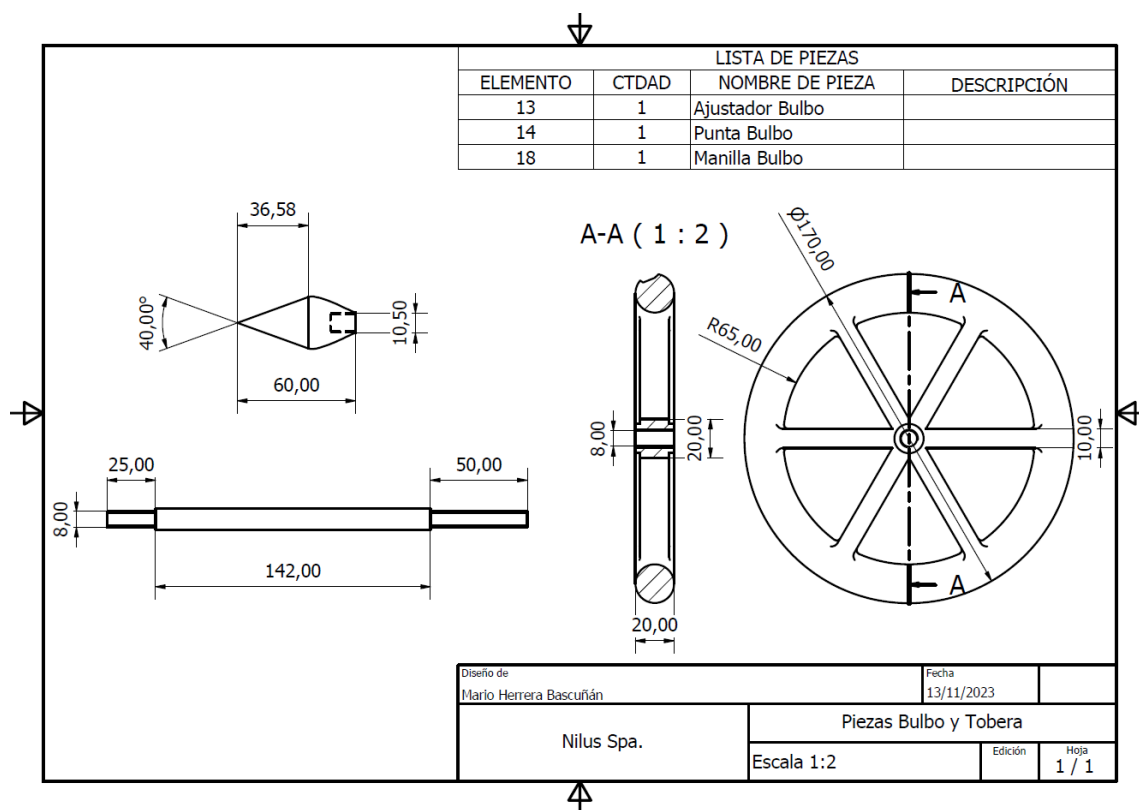
Reemplazando con los datos del proyecto:

$$\sqrt{\frac{4 * 0,004}{(\pi * 0,97 * \sqrt{2 * 9,81 * 40})}} = 0,0136 [m]$$

$$D_0 = 0,0136 [m]$$

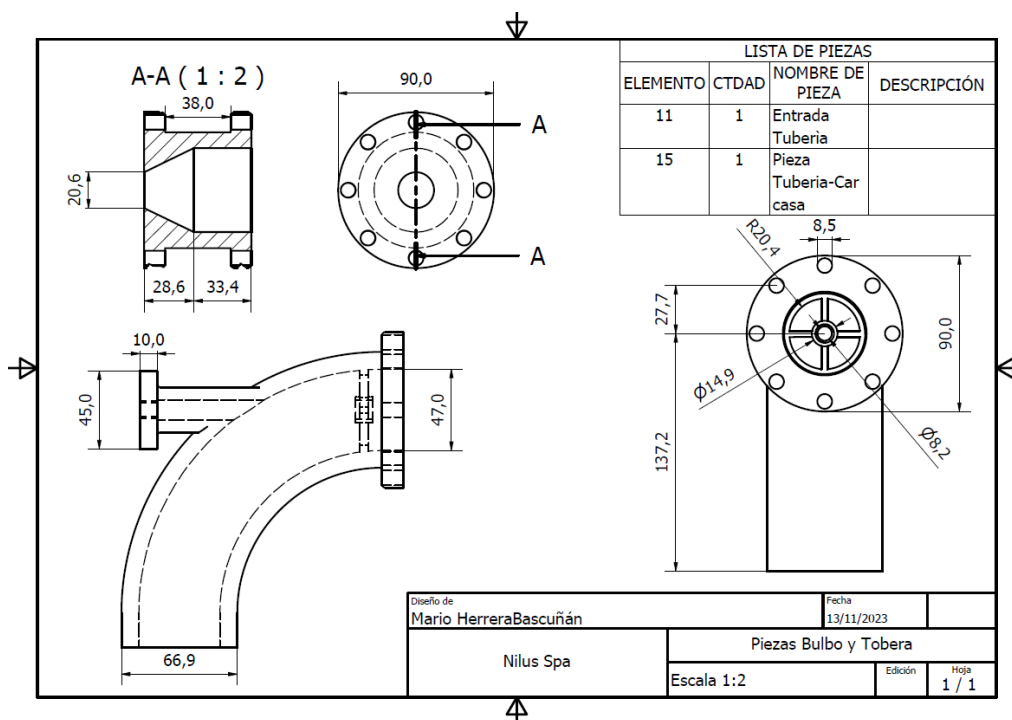
El diámetro D_0 representa el valor mínimo de la sección transversal del chorro que debe impactar en las cucharas. Ahora, para evitar la pérdida de velocidad del chorro de agua, y por recomendaciones de la literatura, se ha incrementado el valor de D_0 en un 10%, esto resulta en un diámetro de chorro de **0,01496** [m] \approx **0,015** [m] que se utilizará.

Anexo N°5: Plano de Bulbo y su ajustado



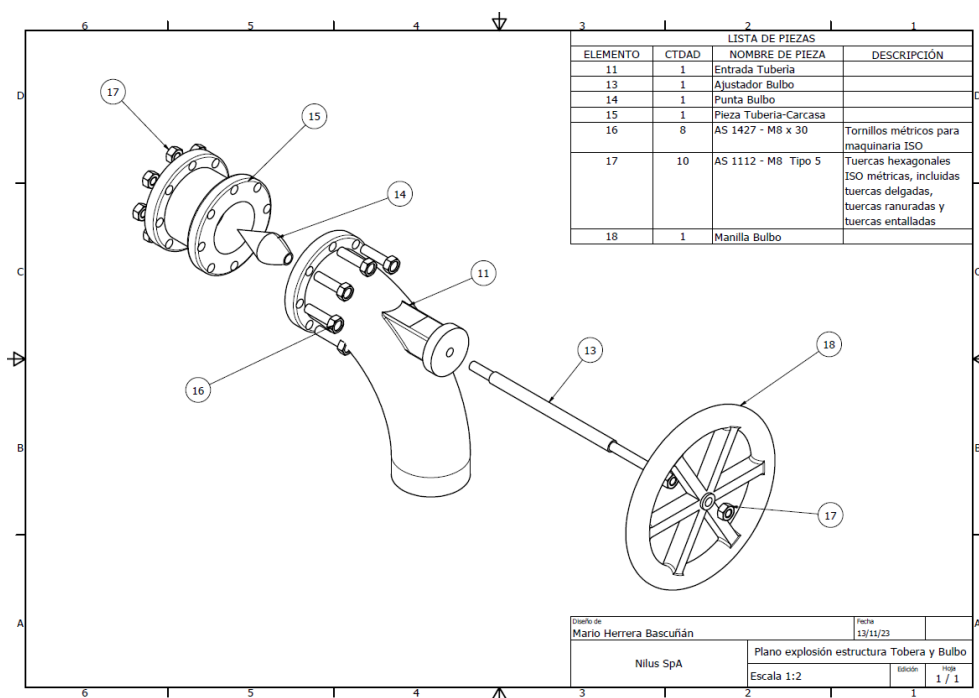
Fuente: Elaboración Propia

Anexo N°6: Plano Tobera y conexión con la carcasa



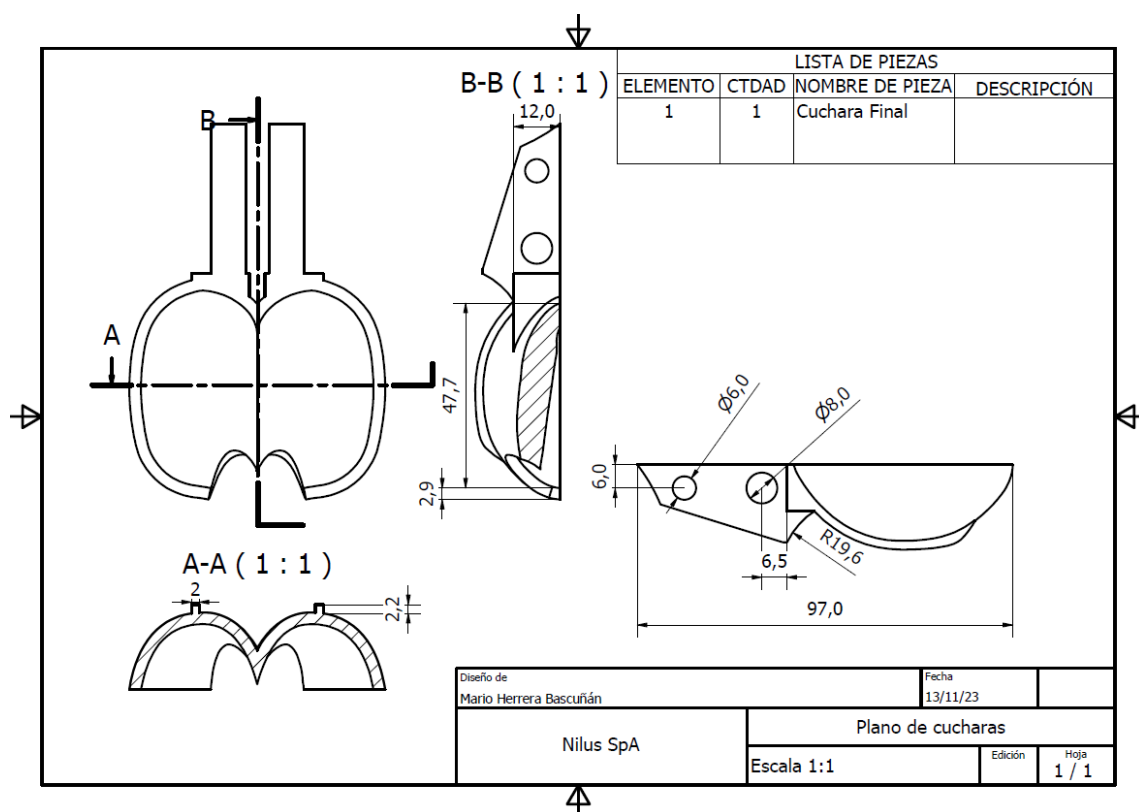
Fuente: Elaboración Propia

Anexo N°7: Plano en explosión de Tobera y Bulbo



Fuente: Elaboración Propia

Anexo N°8: Plano cuchara



Fuente: Elaboración Propia

Anexo N°9 – Segunda parte desarrollo de fase de diseño a nivel de detalle etapa de generación (IV)

5.1 - Diseño de la geometría del rodete

El diámetro Pelton, representado como D_p , se determina mediante la Fórmula 12, que establece el diámetro principal del rodete. Donde “n” corresponde al número de RPM de la Turbina, determinado previamente con un valor de 750 RPM.

$$D_p = \frac{60 * K_u * \sqrt{2 * g * H}}{\pi * n}$$

Fórmula 13 – Diámetro rodete Pelton

Reemplazando con los datos del proyecto,

$$\frac{60 * 0,46 * \sqrt{2 * 9,81 * 40}}{\pi * 750} = 0,328 [m]$$

$$D_p = 0,328 [m]$$

Además, se destaca la importancia de δ , que representa la relación de diámetros entre el diámetro del chorro “d” y el diámetro Pelton. Esta relación se expone a continuación:

$$\delta = \frac{d}{D_P}$$

Reemplazando con los elementos anteriormente calculados:

$$\frac{0,01875}{0,328} = 0,057$$

$$\delta = 0,057$$

Conociendo el valor del largo de la cuchara que sobresale del rodete “f” (Figura 15), es posible calcular el diámetro máximo de la Turbina. Es decir, es el diámetro total de la turbina considerando el rodete y las cucharas. Este diámetro máximo se denomina D_a y se obtiene mediante la Fórmula 14.

$$D_a = D_P + 2 * f$$

Fórmula 14 – Diámetro máximo turbina Pelton

Reemplazando con los datos previamente determinados:

$$0,328 + 2 * 0,01687 = 0,3617 [m]$$

$$D_a = 0,3617 [m]$$

Dentro de los valores relevantes en el diseño y desarrollo de Turbinas hidroeléctricas es el número específico de revoluciones. Este número es de carácter adimensional se calcula utilizando la relación de diámetros anteriormente determinada. La Fórmula 15 expone la manera de calcular el número específico de revoluciones para una Turbina Pelton.

$$N_S = 240 * \delta$$

Fórmula 15 – Número específico de revoluciones

Utilizando los datos obtenidos anteriormente:

$$240 * 0,057 = 13,68$$

$$N_S = 13,68$$

En este punto, la metodología expone una tabla que permite comparar la relación de diámetros (δ) con el número específico de revoluciones N_S . La Figura 17 permite comprender el límite de aplicación y validar la calidad de diseño del rodete de la Turbina. La literatura comenta que las Turbinas Pelton deben cumplir que $\delta \leq \frac{1}{10}$ y que el $N_S \leq 24$. Sobre esta base, se valida el correcto dimensionamiento del rodete de la Turbina Pelton.

Límite máximo y mínimo de la relación de diámetros Y del número específico de revoluciones de la turbinas Pelton de un solo chorro¹¹		
<i>Límite de aplicación</i>	<i>Relación de diámetros</i> $\delta = \frac{d_o}{D}$	<i>Número específico de revoluciones</i> $n_s = 240 \cdot \delta$
Límite mínimo (mal rendimiento)	$\frac{1}{100}$	2.4
Límite mínimo práctico (buen rendimiento)	$\frac{1}{30}$	8
Límite máximo (mal rendimiento)	$\frac{1}{7}$	35
Límite máximo práctico (buen rendimiento)	$\frac{1}{9}$	27

Figura 17 – Límites de relaciones de diámetros y número específico de revolución

Fuente: “Diseño de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Micro generación” de Juan Elicer Cortez.

5.2 - Determinación del número de cucharas

Para agilizar el cálculo de la determinación de la cantidad de cucharas, la Figura 18 expone un resumen de las variables necesarias para determinar el número de cucharas.

Símbolo	Valor	Unidad	Detalle
Φ	0,2866	-	Valor ángulo entre el centro del rodete y la salida del chorro de agua
Ψ	0,2797	-	Valor ángulo entre la arista de la cuchara y el punto de salida del chorro de agua

Figura 17 – Ángulos necesarios para determinar el número de cucharas

Representados los valores de los ángulos necesarios en el rodete para determinar el número de cucharas a utilizar, es posible determinar el valor del paso máximo mediante la Fórmula 16.

$$\theta = 2 * \Phi - \Psi$$

Fórmula 16 – Paso máximo entre cucharas

Reemplazando con lo obtenido en la Figura 17:

$$2 * 0,2866^\circ - 0,2787^\circ = 0,2945^\circ$$

$$\theta = 0,2945^\circ$$

Determinado el valor del paso máximo entre las cucharas, se hace posible determinar la cantidad de cucharas “Z” que tendrá la Turbina Pelton. El número de cucharas está determinado por la Fórmula 17, expuesta continuación:

$$Z = \frac{(2 * \pi)}{\theta}$$

Fórmula 17 – Cantidad de cucharas según el Ángulo de paso máximo

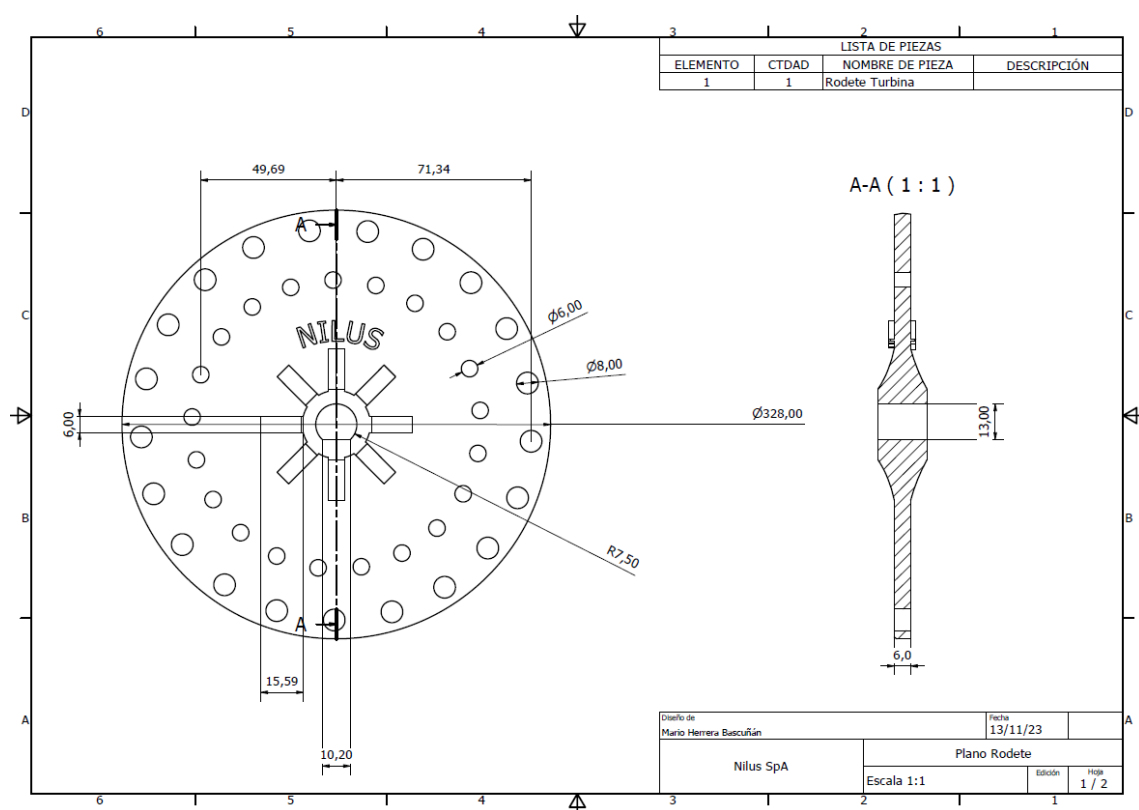
Reemplazando con el ángulo de paso máximo anteriormente determinado:

$$\frac{(2 * \pi)}{0,2945} = 21.3 [Cucharas]$$

$$Z = 21 [Cucharas]$$

Con la determinación de la cantidad de cucharas, el diseño técnico del rodete se encuentra finalizado.

Anexo N°10: Plano rodete



Fuente: Elaboración Propia

Anexo N°11: Tercera parte desarrollo de fase de diseño a nivel de detalle etapa de generación (IV)

Elementos de la Turbina Pelton: Calculo Poleas de Distribución

6.1 - Cálculo poleas de distribución

Para el dimensionamiento de las poleas de distribución, en primera instancia se deben conocer las RPM de la polea impulsora y los RPM de la polea conducida. Anteriormente se determinó que la turbina

operará a 750 RPM, mientras que el generador necesita operar a 3000 RPM para funcionar en condiciones normales. Por lo anterior, se hace la siguiente relación:

$$i = \frac{\text{RPM Turbina}}{\text{RPM Generador}}$$

Fórmula 18– Relación de poleas de transmisión

Reemplazando con los datos del sistema:

$$\frac{750 \text{ RPM}}{3000 \text{ RPM}} = 0,25$$

$$i = 0,25$$

Por tanto, la determinación de la relación de los tamaños de la polea permite determinar los tamaños de la cada polea, considerando como base el tamaño de la polea del generador. Con este hito, la etapa de diseño a detalle de la etapa de generación se encuentra terminada.

Anexo N°12: Cuarta parte desarrollo de fase de diseño a nivel de detalle etapa de generación (IV)

Determinación de las eficiencias del diseño y de los elementos seleccionados bajo las condiciones de borde de los Ice Stupa.

a) Eficiencia de la etapa de generación

Es posible determinar el rendimiento total del diseño de la Turbina diseñada mediante la utilización del número específico de revoluciones (N_s), con un valor en el sistema de $N_s = 13,68$. Utilizando la Figura 18, es posible determinar que rendimiento total del diseño de la Turbina es aproximadamente de un 89%.

<i>Número específico de revoluciones</i> $n_s = 240 \cdot \delta$	6,5	7,5	10	20
Rendimiento total $\eta_{tot}(\%)$	82	86	89	90

Figura 18 – Rendimiento total de la turbina según N_s

Conociendo la eficiencia del generador (89%), se puede decir que la eficiencia total de la turbina es de un 80%.

b) Eficiencia etapa de almacenamiento

Como se determinó anteriormente, la etapa de almacenamiento estará configurada por dos baterías de Ion Litio de 12 [V]. Específicamente de 300 [Ah] y 200 [Ah]. Ahora, estas baterías se comportan de manera distinta dependiendo de las condiciones ambientales. Como se comenta en Zhang et al. (2003), la eficiencia de las baterías de Ion Litio en condiciones de frío extremas (-20°C) disminuye entre un 8-25% dependiendo del tiempo de vida de la batería. Considerando que las temperaturas más frías en el sitio de los Ice Stupas alcanzan los -8°C (Información entregada por Nilus de una estación meteorológica). Por tanto, considerando que la Eficiencia Nominal es de un 96%, a esta se le resta el 8% (porque son baterías nuevas), lo que se traduce en una eficiencia del 88% en las condiciones del proyecto.

c) Eficiencia etapa de suministro

Finalmente, según el fabricante HOYMILES de China, el controlador de carga y descarga no sufre bajo las condiciones de frío extremas (-20°C). Respecto al inversor de corriente, su eficiencia puede disminuir en un 5% por estas condiciones climatológicas. Por lo tanto, el controlador de carga y descarga mantiene su eficiencia del 99% y el inversor de corriente disminuye su eficiencia al 89%.

Anexo N°13: Aspectos técnicos relevantes del generador

Elementos técnicos generador	Etapas de generación
Eficiencia Teórica	89%
Revoluciones del Generador	2500 RPM
Potencia	1,5 KW
Peso	33,5 Kg

Fuente: Elaboración Propia