



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**DISEÑO ÓPTIMO DE VERTEDORES ESCALONADOS
MEDIANTE EL ALGORITMO PSO**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A:
RENÉ DÍAZ CARVAJAL**

ASESOR:

M. EN I. MARTÍN RUBÉN JIMÉNEZ MAGAÑA



CIUDAD NEZAHUALCÓYOTL, ESTADO DE MÉXICO

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*El trabajo que nunca se empieza es
el que más tarda en terminarse*
J. R. R. Tolkien

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a mis padres por el amor, apoyo y paciencia incondicional que me han brindado a lo largo de mi carrera universitaria y de mi vida. Por los sacrificios que han realizado, y por la firmeza con la cual me han infundido consejos y valores a través del ejemplo. Todo este trabajo ha sido gracias a ustedes.

A Columba, Corina y Celeste, mis tres hermosas hermanas, las cuales independientemente de su edad, son un ejemplo de perseverancia y superación. Verlas esforzarse y cumplir todas las metas que se proponen me impulsa a seguir sus pasos y no quedarme atrás.

A mi asesor y mentor, el Ing. Magaña, por la dirección y seguimiento brindado en la culminación de este trabajo. Quien compartió humildemente su consejo, enseñanza y tiempo.

A mis maestros y formadores de la carrera de ingeniería civil, que al compartir su conocimiento y experiencia marcaron cada etapa de mi proceso universitario.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Aragón, por abrirme sus puertas durante esta etapa, permitiéndome experimentar algunos de los mejores años de mi vida.

A toda las personas que me apoyaron y dieron ánimo durante este periodo.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
ANTECEDENTES	12
JUSTIFICACIÓN	13
DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS DE LA TESIS	14
CAPÍTULO I	15
GENERALIDADES SOBRE OBRAS DE EXCEDENCIA	15
1.1 OBRAS DE EXCEDENCIA	16
1.2 VERTEDOR CREAGER	17
1.3 VERTEDOR DE EMBUDO	19
1.4 VERTEDOR DE ABANICO	21
1.5 VERTEDOR DE LABERINTO	23
1.6 VERTEDOR PKW (PIANO KEY WEIR)	25
1.7 VERTEDOR LATERAL	26
CAPÍTULO II.	29
ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE VERTEDORES ESCALONADOS	29
2.1 HISTORIA DE LOS VERTEDORES ESCALONADOS	32
2.2 ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DE LOS VERTEDORES ESCALONADOS	36
2.3 MÉTODO CONSTRUCTIVO	49
2.3.1 <i>Gaviones de Riprap</i>	49
2.3.2 <i>Colchones Reno o Colchones de gaviones</i>	51
2.3.3 <i>Concreto compactado con rodillo</i>	55
Definición	56
Antecedentes	57
Materiales	60
Conglomerante o cementante	60
Agregados	61
Agua	62
Aditivos	63
Clasificación	63
Consideraciones	65
2.4 DISEÑO DE UN VERTEDOR ESCALONADO	67
2.4.1 <i>Anchura del vertedor y diseño de la cresta</i>	68
2.4.2 <i>Altura de los peldaños</i>	69
2.4.3 <i>Tipo de flujo</i>	70
2.4.4 <i>Características del flujo a lo largo de la rápida</i>	71
Regiones del flujo rasante	71
Zona no aireada e inicio de aireación	72
Flujo rápido y gradualmente variado	72
Flujo Uniforme	73
2.5 PROCEDIMIENTO	73

CAPÍTULO III	78
FUNDAMENTOS SOBRE COMPUTACIÓN EVOLUTIVA	78
3.1 ANÁLISIS DE ALGORITMOS	79
3.2 TÉCNICAS CLÁSICAS DE OPTIMIZACIÓN	80
3.3 TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS	81
3.4 HISTORIA Y ANTECEDENTE DE LA TEORÍA EVOLUTIVA	83
3.5 SÍNTESIS EVOLUTIVA MODERNA Y SUS FUNDAMENTOS	88
3.6 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA	92
3.7 CONCEPTOS DE COMPUTACIÓN EVOLUTIVA	97
3.8 INTELIGENCIA DE ENJAMBRE: COMPORTAMIENTO DE HORMIGAS	98
3.8.1 Principios básicos de la inteligencia de enjambre	100
3.9 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) O ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (OEP)	103
3.9.1 Ventajas	106
3.9.2 Desventajas	107
3.10 VARIANTES DEL PSO	107
3.10.1 Sujeción de Velocidad (<i>Velocity Clamping</i>)	108
3.10.2 Peso de inercia (<i>Inertia Weight</i>)	108
3.10.3 Coeficiente de Constricción (<i>Constriction Coefficient</i>)	108
3.10.4 Actualizaciones Síncronas contras Asíncronas (<i>Synchronous Versus Asynchronous Updates</i>)	109
CAPÍTULO IV	110
IMPLEMENTACIÓN DEL PSO EN EL DISEÑO DE VERTEDORES ESCALONADOS.	110
4.1 DISEÑO DEL VERTEDOR ESCALONADO	111
4.1.1 Parámetros del vertedor Escalonado.	111
4.1.2 Condiciones y restricciones	111
4.1.3 Procedimiento de diseño	112
4.1.4 Función de aptitud	113
4.2 MÉTODO PSO	113
4.2.1 Definición del problema	113
4.2.2 Parámetros del PSO	114
4.2.3 Inicio	114
4.2.4 Planteamiento de mejor global inicial	115
4.2.5 Implementación del proceso de competencia	115
4.2.6 Iteración principal de PSO	116
4.2.7 Mostrar evaluación de iteración	116
4.2.8 Amortiguamiento del coeficiente de inercia	116
4.2.9 Coeficientes de constricción	117
4.3 RESULTADOS	117
CAPÍTULO V	118
EJEMPLO DE APLICACIÓN.	118
COCLUSIONES GENERALES	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

INDICE DE CONTENIDOS

FOTOGRAFÍA 1. VERTEDOR DE EMBUDO O MORNING GLORY DE LA PRESA DE MONTICELLO, EN EL LAGO BERRYESSA.	18
FOTOGRAFÍA 2. VERTEDOR DE EMBUDO O MORNING GLORY DE LA PRESA DE MONTICELLO, EN EL LAGO BERRYESSA.	20
FOTOGRAFÍA 3. VERTEDOR DE ABANICO DE LA PRESA FRANCISCO I. MADERO O LAS VÍRGENES, MUNICIPIO DE ROSALES, CHIHUAHUA, 1949.	22
FOTOGRAFÍA 4. VERTEDOR DE LABERINTO DEL LAGO BRAZOS, EN ESTADOS UNIDOS.	23
FOTOGRAFÍA 5. VERTEDOR DE TECLAS DE PIANO O PKW, EN LA PRESA DE MALARCE SOBRE EL RÍO CHASSEZAC EN EL SUR DE FRANCIA.	25
FOTOGRAFÍA 6. VERTEDOR LATERAL SOBRE EL EMBALSE DE PUCLARO EN CHILE.	27
FOTOGRAFÍA 7. VERTEDOR ESCALONADO DE LA RESERVA FEWSTON, INGLATERRA.	30
FOTOGRAFÍA 8. ESTRUCTURA DE DESCARGA ESCALONADA EN LA PRESA DE ALMANSA, ESPAÑA.	34
FOTOGRAFÍA 9. TARJETA POSTAL DE LAS CASCADAS ESCALONADAS EN EL CANAL DU MIDI EN FRANCIA.	35
FOTOGRAFÍA 10. VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA NEW CROTON, ESTADOS UNIDOS.	38
FOTOGRAFÍA 11. VERTEDOR ESCALONADO EN LA PRESA SUPERIOR DE AGUAS TRANQUILAS O UPPER STILLWATER EN UTAH, ESTADOS UNIDOS; DONDE YOUNG DIRIGIÓ EN 1982 EL PRIMER ESTUDIO DE VIABILIDAD EN ESTE TIPO DE ESTRUCTURAS.	41
FOTOGRAFÍA 12. VERTEDOR DE LA PRESA DE OROVILLE, ESTADOS UNIDOS.	44
FOTOGRAFÍA 13. VERTEDOR DE LA PRESA DE OROVILLE, DESPUÉS DE SUFRIR DAÑOS OCASIONADOS POR UN PROBLEMA DE CAVITACIÓN.	44
FOTOGRAFÍA 14. COLCHONES RENO.	52
FOTOGRAFÍA 15. VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA THOMASTON, CONSTRUIDO CON CCR.	56
FOTOGRAFÍA 16. VERTEDOR ESCALONADO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN LA PRESA DE CONTROL DEL RÍO NORTH PARA.	59
FOTOGRAFÍA 17. CHARLES DARWIN.	83
FOTOGRAFÍA 18. GEORGE LOUIS LECLERC (CONDE DE BUFFON).	84
FOTOGRAFÍA 19. ALFRED RUSSEL WALLACE, 1896.	86
FOTOGRAFÍA 20. JOHANN GREGOR MENDEL.	87
FOTOGRAFÍA 21. ALAN TURING.	94
FOTOGRAFÍA 22. HORMIGAS EXPLORANDO EL ESPACIO DENTRO DE UN AMBIENTE DE LABORATORIO.	99
FOTOGRAFÍA 23. TODOS LOS MIEMBROS DE LA ESCUELA DE PECES EXPLORAN SU ENTORNO EN BÚSQUEDA DE ALIMENTO Y DEPREDADORES.	102
<i>FIGURA 1. PRUEBA DE PSO No.1</i>	119
<i>FIGURA 2. PRUEBA DE PSO No.2</i>	120
<i>FIGURA 3. PRUEBA DE PSO No.3</i>	120
<i>FIGURA 4. PRUEBA DE PSO No.4</i>	121

Resumen

Los vertedores escalonados como obra de excedencia son una alternativa que si bien es sumamente viable, aún está en una etapa muy temprana de su desarrollo. Debido principalmente a que hasta hace relativamente pocos años, las especificaciones de su método constructivo eran muy demandantes con respecto a la tecnología de construcción disponible. Esta situación cambió gracias a las investigaciones sobre su comportamiento hidráulico y a los avances en técnicas constructivas, como el Concreto Compactado con Rodillo (CCR).

La metodología propuesta permite implementar la información disponible sobre el diseño de vertedores escalonados con la Optimización por Enjambre de Partículas o Particle Swarm Optimization (PSO), de tal manera que se obtenga una estructura que opere con las mejores condiciones de funcionamiento. Ofreciendo una herramienta que idealmente simplifique la labor de diseño. El programa creado emplea una metodología establecida de diseño de vertedor escalonado, considerando a su vez las restricciones y condiciones de operación que se mencionan en la teoría; a través de una función objetivo. Los resultados obtenidos en este trabajo cumplen con las expectativas, aunque cabe resaltar la necesidad de modelos físicos para comprobar los resultados, debido al aún moderadamente impreciso conocimiento sobre el comportamiento físico de los vertedores escalonados.

Vertedor Escalonado Optimización Enjambre Partículas

Abstract

Stepped spillways as excess structures are an alternative that although highly viable, they are still at a very early stage of its development. Due mainly to the fact that until relatively few years ago, the specifications of its constructive method were very demanding with respect to the available construction technology. This situation changed thanks to research on their hydraulic behavior and advances in construction techniques, such as Roller-Compacted Concrete (RCC).

The proposed methodology allows the implementation of the information available on the design of stepped spillways with the one of Particle Swarm Optimization (PSO), in order to generate a structure that works with the best conditions of operation. Offering a tool that ideally would simplify the design process. The created program uses an established methodology for stepped spillway design, while at the same time taking into consideration the restrictions and operating conditions that are mentioned in the theory; through an objective function. The results obtained in this work meet the expectations, although it is worth highlighting the need for physical models to verify the results, due to the still moderately imprecise knowledge about the physical behavior of stepped spillways.

Stepped Spillway Particle Swarm Optimization PSO

INTRODUCCIÓN

Esta tesis propone un método de diseño de vertedores escalonados basado en el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas o Particle Swarm Optimization (PSO), con el fin de optimizar diversos aspectos de la estructura hidráulica de dicho vertedor, principalmente lo que le concierne a el perfil de la estructura. Esta metodología realiza un proceso iterativo, por medio de un enjambre de partículas, que exploran el hiperespacio en búsqueda de posibles soluciones hasta encontrar aquella que se ajuste a los valores límite propuestos. El método propuesto tiene que ser capaz de igualar o mejorar los resultados obtenidos por otros métodos de optimización existentes.

Planteamiento del problema

Actualmente, los métodos de optimización metaheurísticos se han extendido a una multitud de ámbitos que abarcan diferentes áreas y disciplinas, en gran parte debido a los excelentes resultados que ha brindado su uso en dichos campos. La literatura concerniente a estos métodos metaheurísticos de optimización es sumamente escasa, especialmente en el idioma español, e incluso la que existe en diversos portales científicos tiene poca relación alguna con la optimización de vertedores escalonados.

Los vertedores escalonados son una de las posibles opciones de obras de excedencia que existen, es decir, estructuras capaces de descargar volúmenes excedentes en una presa, lo cual es crucial para su correcto funcionamiento; ya que asegura la correcta conducción de agua fuera del vaso y aguas abajo, reduciendo daños a la estructura y evitando riesgos. Estos vertedores se han vuelto una alternativa práctica y crecientemente prometedora en los últimos años, gracias al desarrollo de métodos constructivos y tecnologías de concreto, en específico el Concreto Compactado con Rodillo. Sin embargo, previo a este periodo, y debido a su

poca conveniencia, su investigación y experimentación fue limitada a la demanda de la industria de la construcción; por lo que aún hoy en día existe una gran área de oportunidad para la exploración e indagación de conocimiento en su diseño y optimización.

Antecedentes

Los vertedores escalonados son un concepto que a lo largo de la historia ha sido utilizado en mayor y menor medida, con diferentes resultados. Existen ejemplares que datan de 1300 a. de C., pero debido a las implicaciones constructivas que presenta su perfil escalonado, su puesta en práctica se vio limitada a obras de pequeño tamaño con capacidades de descarga pequeñas. Bastaría con el desarrollo del Concreto Compactado con Rodillo y avances tecnológicos en maquinaria de construcción, alrededor del siglo XX, para que surgiera un renovado interés en este tipo de estructuras; permitiendo su incorporación en grandes proyectos que antes eran imposibles. Creando así un creciente interés en sus propiedades, características y potencial, en especial en lo referente a la optimización de su funcionamiento.

La optimización por enjambre de partículas o PSO por su parte, fue desarrollada con el propósito de emular el comportamiento de grupos de animales que no cuentan con un líder definitivo dentro de dicha sociedad, tales como aves y peces. Donde el conocimiento colectivo es alcanzado mediante el intercambio de información entre individuos de dicho grupo, hasta encontrar una condición favorable; repitiendo este proceso hasta obtener el mejor resultado posible, principalmente en lo referente al hallazgo de ricas fuentes de alimento. Este proceso natural es adaptado para su uso en ingeniería, mediante programas de cómputo, que exploran regiones del

hiperespacio analizando las posibles soluciones y comparándolas con parámetros definidos hasta alcanzar el resultado deseado. Este algoritmo es una valiosa herramienta que desde su concepción ha sido utilizada en diferentes disciplinas como bioinformática, análisis lingüístico, programación, diseño de sistemas de distribución de agua.

Es así que dos conceptos de áreas completamente diferentes se incorporan en este trabajo de tesis con el propósito de obtener un mejor diseño en vertedores escalonados que el que se tiene disponible hasta la fecha.

Justificación

A pesar de que los vertedores escalonados son conceptos sumamente antiguos y cuyo uso ha sido propagado a lo largo de la historia por diferentes civilizaciones, no existe conocimiento detallado de su diseño hidráulico previo a principios del siglo XX, fue hasta 1923 con la presa de Gilboa en Estados Unidos que se conduciría el primer estudio minucioso sobre estas estructuras. Y a partir de esas fechas se han logrado avances increíbles, hoy en día existen procedimientos de diseño para vertedores escalonados que han dado soluciones efectivas en modelos y simulaciones a escala, así como en su posterior aplicación práctica. Pero a pesar de lo anterior mencionado, en el área aún existen una gran cantidad de opciones viables inexploradas que podrían probarse de suma utilidad en la búsqueda de soluciones en el diseño de vertedores escalonados. Es por esta razón, que es este proyecto se incorpora la optimización por enjambre de partículas, la cual es una herramienta de bajo costo de implementación que ha probado una y otra vez ser muy eficiente en aspectos de soluciones a problemas de alta complejidad, igualando o mejorando los resultados disponibles en sus campos de aplicación.

Descripción de los capítulos de la tesis

En el capítulo I se describen brevemente los tipos de vertedores hidráulicos existentes y su funcionamiento, en específico los Creager, abanico, embudo, laterales, laberinto y PKW. Abordando principalmente aquellas características que los vuelven únicos, su funcionamiento y condiciones bajo las cuales operan.

En el capítulo II se mencionan los avances realizados hasta la fecha en el diseño de los vertedores escalonados, así como quien los ha realizado y que circunstancias dieron paso a su renovado auge. También se detallan las consideraciones constructivas y especificaciones necesarias para su funcionamiento. En conjunto con los pasos y expresiones que conforman su procedimiento de diseño.

En el capítulo III se establece las bases que dieron forma y creación a la computación evolutiva así como los principios y paradigmas a los que esta dio origen. Entre ellos principalmente al algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas o Particle Swarm Optimization por sus siglas en inglés (PSO). el cual es de clave importancia en este trabajo. Para expandir las ideas que conforman el centro de este apoyado fue necesario presentar información referente al análisis de algoritmos, teoría evolutiva, principios de inteligencia artificial entre otros.

En el capítulo IV se explicará la Implementación del PSO para el diseño de vertedores escalonados, así como el procedimiento general seguido para incorporar el algoritmo al diseño de la estructura.

En el capítulo V se expondrá un ejemplo de aplicación del algoritmo utilizado anteriormente.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES SOBRE OBRAS DE EXCEDENCIA

1.1 Obras de excedencia

En un flujo hídrico superficial, las obras de excedencia son aquellas estructuras que permiten la descarga de volúmenes de agua excedentes a la capacidad de control en un almacenamiento. De manera que evite daños a otras estructuras, mediante su segura conducción fuera del vaso y aguas abajo del río. Normalmente se utilizan vertedores pero en casos especiales de pequeñas obras se pueden emplear sifones.

Cuando la topografía del lugar lo permita debe considerarse la posibilidad de emplear una combinación de vertedores de servicio y auxiliares, pues esto muchas veces repercute en una economía del proyecto. Se llama vertedor de servicio a aquel que funciona para avenidas de pequeño periodo de retorno, es decir aquellas que se presentan más frecuentemente. El vertedor auxiliar es el diseñado para funcionar cuando las avenidas anteriormente mencionadas sean rebasadas (Arreguín, 2000).

Las obras de excedencia se componen principalmente de los siguientes elementos:

- a) Canal de acceso. Conduce el agua del vaso de la presa a la estructura de control. Su uso es más frecuente en presas de tierra y de materiales graduados que en las de concreto, al colocarse en laderas o puertos en lugar de sobre ellas (Arreguín, 2000).
- b) Estructura de control. Sirven para regular y controlar los derrames en una presa. La regulación puede efectuarse mediante una sección de control constituida por un simple umbral, un cimacio, un orificio o una tubería, que pueden descargar libremente o sumergidos Pueden estar controlados por una serie de vigas (plumas) para controlar y regular las avenidas, hasta un conjunto de compuertas (radiales o deslizantes) (Sotelo, 1994).

- c) Conducto de descarga. Lleva los volúmenes excedentes hacía el río aguas abajo de la presa y puede ser un canal o túnel. Los conductos de descarga más usados son los conductos cerrados por túnel o cortina y los canales a cielo abierto (Arreguín, 2000).
- d) Estructura terminal. Tiene por objetivo disipar la energía cinética del agua para evitar daños en la zona de descarga, evitando posibles repercusiones en la seguridad de la presa. Usualmente se emplean saltos de esquí, deflectores, tanques amortiguadores o cualquier otra geometría que disipe la energía del agua (Arreguín, 2000).
- e) Canal de salida. Continúa después de la estructura terminal y permite que el agua llegue al cauce del río sin producir remansos hacía aguas arriba que afecten el funcionamiento de la propia estructura terminal o de otras estructuras que también descarguen al río (Sotelo, 1994).

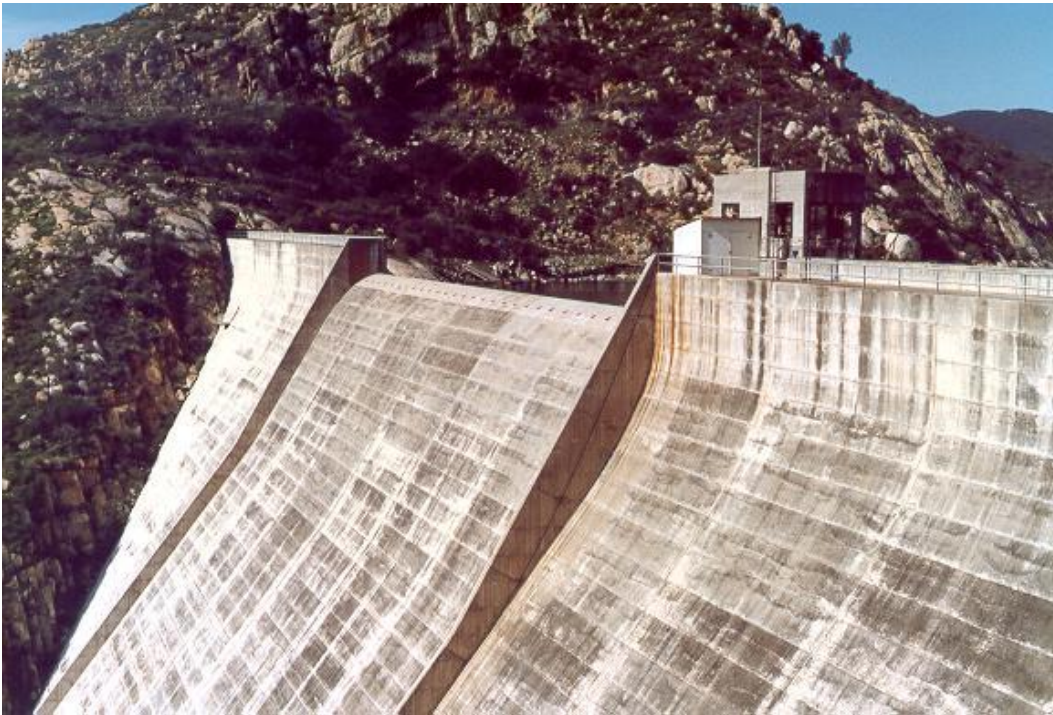
A continuación se presentan los principales tipos de vertedores, así como sus características principales. Con excepción de los vertedores escalonados, los cuales serán abordados en capítulos posteriores.

1.2 Vertedor Creager

Creager fue uno de los primeros que estudiaron la forma del perfil de un cimacio y al que obtuvo, por muchos años se le conoció como “perfil Creager”. Posteriormente muchos investigadores y dependencias estudiaron el perfil para diferentes condiciones geométricas y de operación (Sotelo, 1994).

Los vertedores de cimacio consisten de una cresta de control de pared gruesa, cuyo perfil tiene aproximadamente la forma de la superficie inferior de una lámina ventilada que vierte libremente sobre la cresta, permitiéndole alcanzar un mejor coeficiente de descarga y mantener la estabilidad

estructural a través del peso del concreto o mampostería utilizado en el cuerpo de la obra. Continúa con una rápida tangente, de gran pendiente y corta distancia, a la que le sigue otra curva que termina en la tangente a la plantilla del canal de conducción, tanque de amortiguación o salto de esquí (Sotelo, 1994).



Fotografía 1. Vertedor de Embudo o Morning Glory de la presa de Monticello, en el lago Berryessa.

La descarga puede ser controlada o libre dependiendo de si se utilizan elementos adicionales para regular las descargas, como lo son las compuertas.

El perfil del cimacio puede adaptarse de manera óptima a la lámina vertiente que corresponde a un solo caudal o carga, y funciona con menor o mayor eficiencia en diferentes condiciones de operación. Para ello es fundamental

establecer mediante análisis el caudal que sirve de “condición de diseño”. Con frecuencia dicha condición se elige de manera que coincida con la de gasto o carga máxima que se espera descargue el vertedor; en algunos casos se puede emplear la intermedia, pero la elección final debe tratar de lograr el mejor funcionamiento de la obra para cualquier condición de operación (Sotelo, 1994).

La forma y dimensiones de la sección depende principalmente de la inclinación del paramento y de la carga de diseño, Los criterios de diseño más utilizados para este tipo de cimacios son el de Waterways Experiment Station (WES) y el de US Bureau of Reclamation (USBR).

1.3 Vertedor de embudo

Le estructura de control consiste de un cimacio de planta curva circular que conecta a una lumbrera vertical o inclinada, mediante una o dos curvas verticales al túnel de descarga. Localizada de manera que propicie un flujo con acceso radial y libre de obstáculos, en caso contrario se recomienda el uso de pilas guadoras en dirección radial colocadas encima del cimacio para evitar la formación de vórtices que reduzcan la eficiencia de descarga. La inclinación de la lumbrera es preferente a fin de proporcionar la separación del escurrimiento desde la clave superior del túnel y permitir que éste trabaje parcialmente lleno. De existir razón importante, la lumbrera puede ser vertical y cambiar de dirección mediante una sola curva (Sotelo, 1994).

Con cargas pequeñas el vertedor opera con flujo libre y de sobrepasarse el gasto de diseño, opera sumergido. Para un flujo libre, el funcionamiento es idéntico al de un vertedor de cresta recta. Siendo esta condición de operación bajo la cual se obtiene el mejor funcionamiento, debido a que con poco incremento de la carga aumenta sensiblemente el gasto (Sotelo, 1994).

Conforme aumenta la carga, el vertedor trabaja parcialmente sumergido y el gasto que descarga queda controlado por la dimensión de la garganta en el conducto de transición, modificando la tendencia en la ley de gastos. Cuando la estructura colectora es ahogada completamente y se llena totalmente la conducción, el funcionamiento del vertedor es el de una tubería a presión. Volviendo a modificar la ley de gastos, lo cual limita aún más la capacidad de evacuación (Sotelo, 1994).



Fotografía 2. Vertedor de Embudo o Morning Glory de la presa de Monticello, en el lago Berryessa.

El vertedor de embudo presenta ventajas en boquillas estrechas de ladera empinadas que no admiten un vertedor a cielo abierto y donde casi siempre se dispone de un túnel de desvío que puede ser utilizado como túnel de descarga. Por estas mismas razones es más conveniente su utilización en aquellos sitios en que se dispone de suficiente información hidrológica que

permita predecir de manera segura el gasto de diseño; ya que en caso de que éste sea rebasado, la eficiencia del vertedor cambia y aparece el peligro de desbordamiento por encima de la cortina.

1.4 Vertedor de abanico

Empleados principalmente cuando es necesario proporcionar una longitud de cresta considerable con cargas pequeñas, es decir un gasto por unidad de longitud de cresta pequeño. Debido a sus características geométricas se obtiene una reducción considerable en las dimensiones horizontales de la estructura en comparación a una cresta recta, con el mínimo de problemas de ondas cruzadas por efecto de contracción del canal. Posibilitando en un canal de gran pendiente y dimensiones menores que el escurrimiento continúe. A su vez, requiere amplio espacio y condiciones topográficas de boquilla abierta o “puerto”, permitiéndole una longitud de cresta vertedora grande con un canal de descarga de menor ancho lo que ayuda a economizar grandes volúmenes de excavación (Sotelo, 1994).

La estructura de control está construida por un cimacio de trazo curvo cuya geometría en planta está concebida para que concentre y dirija el escurrimiento hacía el eje del vertedor, con el fin de obtener una transición al canal de descarga no tan brusca, sin embargo, con el fin de impedir ondas cruzadas en la transición es necesario que el cimacio descargue en una plataforma horizontal o colchón, conectado con el perfil del cimacio mediante una curva para disminuir el impacto de la corriente. Forzando el cambio a régimen subcrítico, para ser cambiado nuevamente de pendiente y de régimen, donde el agua acelera por una transición desde la velocidad crítica, para después continuar en un canal de pendiente supercrítica y sección

constante que normalmente mantiene su geometría hasta la estructura terminal (Sotelo, 1994).

En México existen diversos ejemplos de vertedores de abanico y de igual modo en otros países, en ocasiones teniendo que realizar adaptaciones a su geometría.



Fotografía 3. Vertedor de Abanico de la presa Francisco I. Madero o Las Vírgenes, municipio de Rosales, Chihuahua, 1949.

Una adaptación común es la de dividir un vertedor de abanico en dos siguiendo el eje de simetría, obteniendo dos vertedores conocidos con el nombre de medio abanico, cada uno con la mitad de la capacidad del caudal. Para su diseño se siguen las mismas reglas que en el vertedor de abanico, utilizando la misma carga sobre la cresta pero el doble del gasto por evacuar (Sotelo, 1994).

1.5 Vertedor de laberinto

La particularidad de este tipo de estructuras reside en la forma del vertedor, que tiene forma de “zig-zag”. El funcionamiento de este tipo de vertedor es en lámina libre, pudiendo ser en pared de tipo delgada o de pared curva, no cuenta con limitaciones con respecto a su alimentación o con la morfología del canal de descarga; por lo que puede ser alimentado de forma lateral o frontal (Cordero, Elviro y Granell, 2007).



Fotografía 4. Vertedor de Laberinto del lago Brazos, en Estados Unidos.

Cuentan con una elevada capacidad de descarga para sobreelevaciones reducidas y pueden precisar de menor espacio para evacuar los caudales exigidos, lo que permite realizar una sencilla adaptación de este tipo de estructuras hidráulicas dentro del espacio disponible; aumentando la

capacidad de evacuación respecto a un vertedor recto convencional ubicado en el mismo espacio para una carga igual (Cordero et al., 2007).

Pero esta supuesta ventaja, se vuelve incierta cuando la carga hidráulica sobre el umbral del vertedor crece por encima de determinados valores. Diversas investigaciones establecen como límite de funcionamiento aquel en el que la máxima sobreelevación de la lámina del vertedor es entre 0.5 y 0.7 veces la altura del mismo. Por lo tanto, resultan apropiados en situaciones en las que se quiere restringir la sobreelevación de la lámina de agua, como puede ser el caso de canales o presas en las que se tienen limitados los niveles del embalse por alguna razón (Cordero et al., 2007).

Suelen estar contruidos por módulos en serie que son adosados a lo largo de una directriz que puede adoptar diversas formas geométricas. Lo más común es que la geometría de la directriz permita distribuir de forma regular los módulos, por lo que suele acudir a directrices rectas o arcos de circunferencia. La forma de los módulos puede adoptar formas desde triangulares hasta rectangulares, siendo los más empleados y lógicos desde un punto de vista hidráulico y constructivo, las formas trapeziales (Cordero et al., 2007).

Los perfiles generalmente empleados en la literatura técnica, son principalmente dos tipos, que se denominan "Sharp Crested Weir" y "Quarter Upstream Round Face". Ambos perfiles responden al funcionamiento de un vertedor en pared delgada, aunque el segundo de ellos presenta una morfología que mejora la alimentación del agua. Se considera que los dos perfiles presentan los mismos inconvenientes: erosión de perfil y problemas de cavitación para caudales pequeños; una manera de resolver estos problemas es mediante el empleo de un perfil curvo (Cordero et al., 2007).

1.6 Vertedor PKW (Piano Key Weir)

También conocidos como vertedores en tecla de piano, son una optimización tanto técnica como económica del tipo laberinto, a pesar de haber sido recientemente introducidos. Es debido a esto que su composición y elementos son prácticamente idénticos a sus predecesores, aunque cuenta con cruciales diferencias (Laugier, Lochu, Gille, Leite y Boillat, 2009).



Fotografía 5. Vertedor de Teclas de piano o PKW, en la presa de Malarce sobre el río Chassezac en el sur de Francia.

Su nombre proviene de la apariencia que tiene de teclas blancas y negras visto desde planta. En comparación con el vertedor tradicional de laberinto, las paredes verticales fundadas en un área plana de diseño trapezoidal, son

reemplazadas por paredes verticales laterales y por losas inclinadas aguas arriba y abajo de la cresta. Estas losas son una estructura parcialmente voladiza aguas arriba y aguas abajo, permitiendo que la estructura permanezca en equilibrio (Laugier et al., 2009).

Desde un punto de vista estructural, los vertedores en tecla de piano son estructuras sencillas, sólidas e hiperestáticas. Construidas a base de unidades estructurales simples y rectas, que pueden ser prefabricadas; usando concreto, acero o materiales compuestos (Laugier et al., 2009).

El concepto de tecla de piano es una opción interesante para incrementar la capacidad de descarga de un vertedor al proveer una alta tasa de flujo. A diferencia de los vertedores de laberinto, estos pueden ser instalados en la cima de la mayoría de presas de concreto existentes, debido a que no requieren una substancial área plana y a que son compatibles con sus secciones (Laugier et al., 2009).

Al igual que los vertedores de flujo libre y en comparación con aquellos vertedores que emplean compuertas, son generalmente simples de construir, operar y mantener; no requieren componentes mecánicos u operador. También son más seguros, teniendo un riesgo de falla prácticamente inexistente y una evacuación natural de escombros. Estudios experimentales demostraron que frente a un bloqueo de escombros flotantes, la capacidad de descarga residual es más del ochenta por ciento de la nominal (Laugier et al., 2009).

1.7 Vertedor lateral

La estructura de control la forma un cimacio de cresta recta o curva, que descarga hacia un canal paralelo a la propia cresta, el cual colecta los volúmenes vertidos y los conduce en dirección perpendicular con respecto a

su llegada. El vertido puede ocurrir por un solo lado del colector o por los dos lados, pero en todo caso el colector se mantiene paralelo a la cresta y forma parte de la estructura de control (Sotelo, 1994).



Fotografía 6. Vertedor lateral sobre el embalse de Puclaro en Chile.

Este tipo de vertedor ha sido muy utilizado en México en obras grandes y pequeñas. Se considera una buena solución en boquillas con laderas de poca inclinación o cuando el conducto de descarga tiene que ser un canal muy angosto o un túnel, toda vez que su geometría permite que una cresta de gran desarrollo pueda alojarse en dirección longitudinal del río sin ocupar un gran espacio (Sotelo, 1994).

El funcionamiento de este tipo de vertedor es poco eficiente, debido a la gran turbulencia y vibraciones que produce (Arreguín, 2000).

El diseño de los canales de este tipo de vertedores se basa en la teoría del flujo espacialmente variado, la cual a su vez cuando el gasto es creciente se apoya en la ley de la conservación de la energía. La operación busca que el canal sea capaz de funcionar en régimen subcrítico, supercrítico, o en ambos, es decir, un tramo del canal funciona con régimen subcrítico y la otra con supercrítico. El régimen supercrítico implica tirantes pequeños y grandes velocidades, por lo tanto una caída mayor desde la cresta a la superficie libre del agua en el canal colector, creando mayor turbulencia y vibraciones en la obra; por el contrario con régimen subcrítico se tendrán tirantes mayores, menores velocidades, menor caída y menor turbulencia. Por esta razón es que se recomienda forzar a que el canal trabaje en régimen subcrítico, esto se puede lograr, obligando una sección de control al final del canal, por ejemplo, por medio de un estrechamiento o un escalón (Arreguín, 2000).

CAPÍTULO II.

ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE VERTEDORES ESCALONADOS

Los vertedores escalonados han adquirido un renovado interés en años recientes, todo esto debido al desarrollo de la tecnología del concreto compactado por rodillo (CCR) aplicado a la construcción de presas, realizado en los años setenta (Amador, Sánchez-Juny y Dolz, 2006)

Un vertedor escalonado es compatible con las pendientes y métodos de colocación empleados en la construcción de presas de CCR (Amador et al., 2006). La presencia de escalones logra aumentar de manera considerable la resistencia al flujo y la disipación de energía, permitiendo reducir el tamaño de las estructuras disipadoras de energía aguas abajo de la rápida (tanques amortiguadores, cubetas de lanzamiento, entre otras). La autoaireación del flujo en la estructura escalonada contribuye además a prevenir riesgos de cavitación en la rápida (Amador et al., 2006).



Fotografía 7. Vertedor escalonado de la reserva Fewston, Inglaterra.

A la par del desarrollo implicado con el método constructivo de este tipo de vertedores, se han desarrollado múltiples trabajos de investigación de suma

relevancia en todo el mundo. Estos estudios están principalmente divididos de acuerdo al tipo de régimen existente en el vertedor (Amador et al., 2006). Entre estos estudios antes mencionados destacan:

Flujo de escalón a escalón

- Peyras et al. (1992)
- Chanson y Tombes (1997)
- Essery y Horner (1978)
- Yasuda y Ohtsu (1999)
- Pinheiro y Fael (2000)
- Kamash et al. (2005)

Flujo rasante

- Essery y Horner (1978)
- Diez-Cascón et al. (1991)
- Tozzi (1992)
- Elviro y Mateos (1995)
- Matos (1995)
- Chamani y Rajatnam (1999)
- Chanson y Tombes (2001)
- Sánchez-Juny (2001)
- Boes y Hager (2003)
- Ohtsu et al. (2004)
- González y Chanson (2004)
- Meireles (2004)

Flujo de transición

- Chanson y Tombes (2001,2004)
- Sanchez-Juny (2005)
- Dolz (2005)

Sin embargo, en los estudios previos a 1993 no se consideraron los efectos de aireación del flujo. A partir de esta fecha, la mayoría de los estudios se han enfocado en vertedores escalonados con pendientes grandes, típicas en presas de gravedad (Gonzáles y Chanson, 2007).

Actualmente los vertedores escalonados, además de ser usados para evacuar avenidas en presas de concreto, se usan como canales para peces en diques, como disipadores de energía en canales y ríos, o como aireadores en plantas de tratamiento y torrentes contaminados, donde el aire

ingresado oxigena artificialmente las corrientes con bajo contenido de oxígeno disuelto (González y Chanson, 2007).

2.1 Historia de los Vertedores Escalonados

A pesar de lo innovadora que parezca la idea de un vertedor escalonado, o que su realización sólo sea posible con el desarrollo de técnicas tales como la de Concreto Compactado con Rodillo, lo cierto es que el diseño de vertedores escalonados se remonta a la antigüedad.

Los canales escalonados fueron diseñados en un principio para contribuir a la estabilidad de una estructura, cumpliendo tareas ahora obvias; cómo lidiar con la descarga de una presa o disipar energía.

El ejemplar de vertedor escalonado más antiguo del que se tiene registro data de 1300 a. de C., presuntamente una presa escalonada para excedencias en Acarnania, Grecia, de 10.5 m de altura y una cresta de 25 m de largo, con una estructura de catorce escalones (Chanson, 2002).

Otros vertedores escalonados antiguos, cuyas ruinas aún existen, son los de las dos presas del río Khosr en Iraq, parte del sistema de afluentes del río Tigris. Construidas en el año 649 a. de C. bajo el liderazgo del rey asirio Senaquerib. Diseñadas para suplir del recurso hídrico a la capital, Nínive, del imperio de Asiria; cerca del actual Mosul. Ambas presas contaban con un paramento escalonado aguas abajo, con la intención de descargar el río sobre sus crestas (Chanson, 2002).

Años más tarde, los romanos construyeron grandes obras de excedencias en su imperio, algunos de sus restos están en Siria, Libia y Túnez. Con una estructura impresionante en la presa de Kasserine, con un vertedor que se

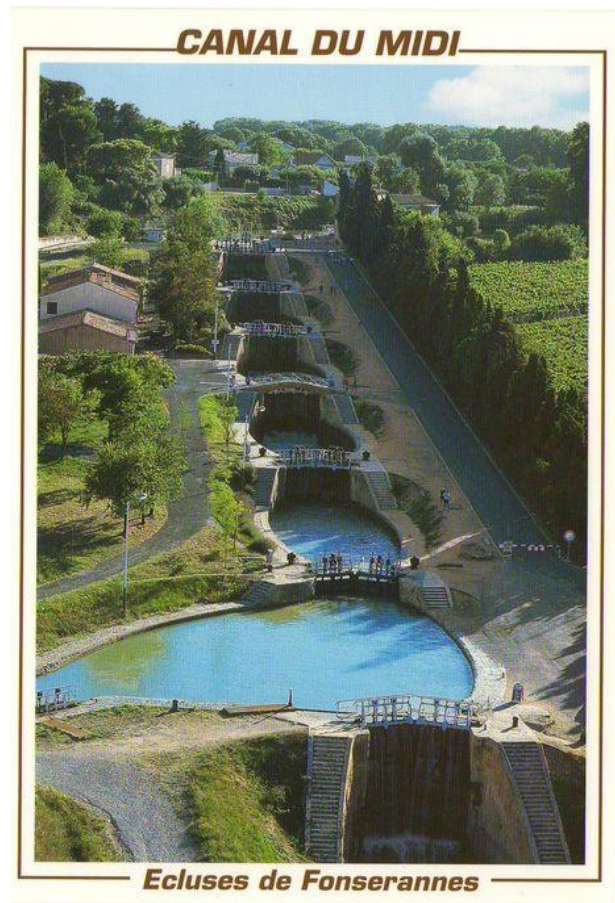
extendía en la cresta de 150 metros de largo. De igual manera, los acueductos romanos incluían un número de diseños de cascadas en escalón, mayoritariamente contruidos con propósitos meramente estéticos. Durante el siglo XVI al XVIII, algunas *Grandes Cascades* (Grandes Cascadas) fueron incluso de mayores dimensiones que algunas estructuras contemporáneas (Chanson, 2002).

Después de la caída del imperio romano, ingenieros musulmanes ganaron experiencia de los nabateos, romanos y sabeos; con la que construyeron presas con obras de excedencias escalonadas en Iraq (Adhaim), Irán (Khajou), Arabia Saudita (Darwaish) y España (Mestalla). Los ingenieros españoles continuaron usando las estructuras romana y musulmanes, pero también diseñaron nuevos vertedores y presas con escalones. Como los de las presas de Almansa, Barrueco de Abajo y de Alicante. Entre los años 1400 y 1850, la competencia de los ingenieros españoles era la más portentosa para los estándares mundiales. El conocimiento español fue exportado a “Las Indias” tras la conquista de América (Chanson, 2002).



Fotografía 8. Estructura de descarga escalonada en la presa de Almansa, España.

En Francia, a mediados del siglo XVII los ingenieros habían aprendido de la experiencia española. En el suroeste, el sistema de abastecimiento del *Canal du Midi* (Canal del Mediodía), diseñado por Riquet y extendido por Vauban, incluyó varias cascadas escalonadas. Los canales escalonados fueron diseñados para prevenir la erosión (Chanson, 2002).



Fotografía 9. Tarjeta postal de las cascadas escalonadas en el Canal du Midi en Francia.

En Inglaterra, presas fueron construidas cerca de altos hornos y molinos hidráulicos, algunas de ellas incluían vertedores escalonados; se considera que los ingenieros ingleses ganaron conocimiento de los romanos que construyeron acueductos y presas durante su ocupación (Chanson, 2002).

Cabe mencionar que se conocen la existencia de algunas estructuras de madera relativamente antiguas. Se han reportado estructuras de madera en Europa Central, previas al año 1600. Dos estructuras, una presa en Kobila y otra en Rusia. En la parte noroeste de América se tiene registro de presas de madera desde el año 1600. Durante el periodo de 1800-1920, la presas de

madera tuvieron un auge en América, Australia y Nueva Zelanda. La mayoría de estas presas eran de 3 a 10 m de altura, con la rara excepción que lograba alcanzar hasta 30 m de manera exitosa (Chanson, 2002).

En México, varias obras de excedencias escalonadas fueron construidas entre el siglo XVIII y XIX, algunas de estas obras continuaron operando hasta principios del siglo XX. Una de ellas fue la presa El Pabellón en el estado de Aguascalientes, también conocida como presa San Blas, construida con mampostería, cuya principal función era el abastecimiento de agua para irrigación de cultivos y aprovechamiento mediante uso de molinos hidráulicos (Chanson, 2002). La presa incluso sigue en pie hoy en día, aunque su uso ha pasado a ser principalmente el de una atracción turística.

2.2 Estado del arte de la investigación y diseño de los vertedores escalonados

Los vertedores y canales escalonados han sido usados desde hace más de tres mil años, y desde la antigüedad el diseño de los vertedores escalonados ha sido reconocido por la reducción de las velocidades en el flujo de agua. Han sido usados exitosamente por siglos. Y si bien es probable que ingenieros del pasado hayan reconocido los patrones de flujo y funcionamiento de estas estructuras escalonadas, no existe evidencia de directrices o instrucciones de su diseño hidráulico incluso a principios del siglo XX (Chanson, 2000). Esto se debe en gran medida al conocimiento perdido y a que previo a esta época, rara vez estuvieron a la altura de sus expectativas; especialmente si se les compara a las alternativas más baratas de aquellos años. Nuevos progresos en las características de disipación de energía de saltos hidráulicos favorecerían el diseño de tanques amortiguadores aguas abajo de vertedores escalonados; permitiendo mayor

disipación de energía y estructuras de menor tamaño, contribuyendo a la significativa reducción de costos.

Durante el periodo del Renacimiento, ingenieros españoles e italianos reconocieron y desarrollaron estos principios. Leonardo Da Vinci expresó estas ideas básicas de flujo, “Entre más rápido es, más desgasta su canal” y si una cascada “está hecha de escalones altos y anchos, después de recorrer esta escalera, las aguas no serán capaces de descender con un golpe de gran fuerza” (Chanson, 2000).

En el siglo XVI Turriano estuvo involucrado en el diseño de la presa Alicante, la cual incluía un vertedor escalonado, equipado con siete escalones. Incluyó bosquejos de obras de excedencia escalonadas y de una presa similar a la de Pulteney en la ciudad de Bath (Chanson, 2000).

En 1876 Humber señaló en su libro que “El vertedor, generalmente tendrá que estar hecho con una pendiente muy inclinada, y para evitar el desgaste excesivo que podría ser resultado de la construcción de un canal uniforme, en la mayoría de los casos es aconsejable llevar a cabo un vertedor con una serie de escalones; los cuales reducirán la velocidad”. Lo anterior fue demostrado en trabajos que este realizó en Rotherham (Chanson, 2000).

En 1871 Sankey recomendó una cresta ancha para un vertedor, seguida de una reducción en el ancho del canal, asociada con la introducción de un conjunto de escalones. Aguas abajo de la contractura del canal, mencionó que “El suelo cayó 60 pies por la serie de escalones, para asegurar el control de la velocidad de la corriente y una silenciosa descarga del torrente en el río” (Chanson, 2000).

En un estudio hidráulico sobre cascadas conducido en 1894 de manera analítica por Armani, se describía un vertedor de escalones donde se consideraba a grandes rasgos al flujo como una sucesión de vertedores

libres o sumergidos. Un estudio similar fue realizado en un laboratorio por Koch en 1923, aunque sin responder a las principales interrogantes sobre los detalles de las características de este flujo hidráulico (Hager y Pfister, 2013). Pero ambas investigaciones crearían precedente para lo que más tarde se convertiría en norma.

Los vertedores escalonados modernos se convirtieron en una variación de diseño comparado con vertedores y estructuras hidráulicas estándar de 1900 (Hager y Pfister, 2013). Algunos ejemplos son:

- La presa Gmünd en Alemania.
- La presa de New Croton en Estados Unidos.
- La presa Eschbach Alemania.
- La cascada en el sistema de acueducto de Los Ángeles en Estados Unidos.



Fotografía 10. Vertedor escalonado de la presa New Croton, Estados Unidos.

El primer estudio exhaustivo sobre los vertedores escalonados fue dirigido por Gausmann y Madden en 1923 en la presa de Gilboa en Estados Unidos, para la Junta de Suministro de Agua de la ciudad de Nueva York (Board of Water Supply of New York City), como parte del sistema Catskill; con modelos a escala 1:50, 1:20 y 1:8. Debido a las cargas relativamente pequeñas presentes en la investigación, el flujo que fue principalmente estudiado fue el de escalón a escalón, donde el flujo no forma una configuración continua como en el flujo rasante. La sección, en contraste con la práctica moderna, fue moldeada para que el flujo fuese alterado, ocasionando una mayor disipación de energía. Descubrieron que todos los escalones fueron afectados por el flujo de agua para descargas pequeñas, mientras que para descargas mayores, el flujo impactaba únicamente cada dos o cada tres escalones. La dispersión entre los resultados obtenidos de los tres modelos fue parcialmente grande, particularmente entre los modelos de escalas 1:20 y 1:50, situación que hoy en día se atribuye a efectos de escala. A pesar del rudimentario conocimiento de modelos hidráulicos de 1920, este estudio destaca en temas de experimentación y análisis de datos (Hager y Pfister, 2013).

En 1953 Peterka afirmó que una concentración de aire cerca de la superficie inferior de un vertedor escalonado del 5 al 8 por ciento es suficiente para evitar el daño por cavitación (Frizell, 2006).

Fue hasta 1960 donde Peterson y Mohanty propusieron tres tipos de flujos para canales abiertos con cierta inclinación a los que llamaron flujos tranquilos (tranquil), agitados (tumbling) y rápidos (rapid flows); basados en observaciones de corrientes naturales y de canales de laboratorio (Hager y Pfister, 2013).

Todo indica que el primer estudio del diseño actual de los vertedores escalonados fue llevado a cabo por Razvan en 1966. Mediante un arreglo

que involucraba una porción de cresta bajo la cual una serie de escalones de altura constante fueron añadidos. Debido a la pequeña altura de los escalones, el flujo fue solo parcialmente aireado. Entre los datos se incluía un coeficiente de descarga, características de la descarga en la base del vertedor escalonado y el porcentaje de disipación entre distintas configuraciones de pendientes. También señaló aspectos de cavitación e incluyó aspectos generales de diseño; aunque dada la naturaleza exploratoria de la investigación, éstos no son aplicables desde una perspectiva moderna (Hager y Pfister, 2013).

En 1978 Cain llevó a cabo una investigación en relación a la autoaireación de flujos superficiales libres para vertedores de pendientes suaves. Este tipo de pruebas fueron replicadas años más adelante por Wood en 1983 y Wilhelms Y Gulliver en 1994 (Frizell, 2006).

En 1979 Stephenson propuso estabilizar canales con forros rocosos, debido a su resistencia contra olas y altas velocidades; donde el equilibrio se basaba entre las fuerzas de conducción y de retención. Presentó criterios de estabilidad, obteniendo una ecuación de movimiento incipiente en rocas, que consiste en una forma generalizada de la ecuación de Shields en ingeniería de ríos. Con base en los estudios de Essery y Horner de 1978, una distinción entre el flujo de escalón a escalón (nappe) y rasante (skimming) fue tomada en cuenta. Los reportes de estos proyectos, presentados ante la Asociación de la Investigación e Información de la Industria de la Construcción o CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), son los que introducen por primera vez la noción de estos dos tipos de flujo; los cuales hoy en día son un estándar en el estudio de los vertedores escalonados (Hager y Pfister, 2013).

En 1982 Young dirigió un estudio de viabilidad sobre un proyecto de vertedor escalonado, en específico el de la presa Superior de Aguas Tranquilas

(Upper Stillwater Dam) en Utah. La primera presa de Concreto Compactado con Rodillo de la USBR (United States Bureau of Reclamation). Donde, entre otras cosas, se realizó el estudio de un modelo hidráulico para investigar si el diseño propuesto era viable, y en qué grado el vertedor escalonado era capaz de disipar energía. Tanto el flujo de escalón a escalón como el rasante fueron observados. Se incluyó de igual manera la técnica de construcción con Concreto Compactado con Rodillo y la transición óptima de cresta a vertedor (Hager y Pfister, 2013). A este trabajo se le acredita el haber introducido de forma exitosa al vertedor escalonado como una opción factible, a las necesidades y requerimientos de cualquier otra obra de excedencia.



Fotografía 11. Vertedor escalonado en la presa Superior de Aguas Tranquilas o Upper Stillwater en Utah, Estados Unidos; donde Young dirigió en 1982 el primer estudio de viabilidad en este tipo de estructuras.

Fotografía 11. Vertedor escalonado en la presa Superior de Aguas Tranquilas o Upper Stillwater en Utah, Estados Unidos; donde Young dirigió en 1982 el primer estudio de viabilidad en este tipo de estructuras.

En 1985 Sorensen evaluó el desempeño de los vertedores escalonados mediante el estudio de un modelo hidráulico. El modelo estaba conformado por un cimacio tipo Creager, seguido de escalones de igual altura, a excepción de los primeros escalones, todo con el propósito de permitir una transición continua entre el cimacio Creager y la sección escalonada. Los propósitos primarios del estudio eran evaluar la efectividad de la transición de flujo de las porciones de mayor y menor pendiente del vertedor, cuantificar la disipación de energía y definir las características del flujo. Encontrando una vez más que los vertedores escalonados son capaces de disipar una cantidad considerable de energía y que la transición de flujo propuesta puede ser ajustada de manera simple en la práctica. Al término de éste señalaba la importancia de investigar y optimizar la geometría de los escalones y la elevación de la cresta (Hager y Pfister, 2013).

La razón principal por la cual se diseñan vertedores escalonados es para tomar ventaja de la disipación de energía que se desarrolla por el flujo sobre los escalones. Las investigaciones iniciales sobre los vertedores escalonados mostraron resultados prometedores para disipar energía por lo que los diseñadores buscaron pasar grandes cantidades de descarga, llevando las investigaciones hacia la dirección de los regímenes de flujos rasantes. Desde 1988, Houston ya reportaba en sus estudios la disipación de energía como función relativa de la energía perdida en comparación a vertedores lisos; así como la carga teórica disponible, este tipo de pensamiento sería reiterado más tarde por Stephenson en 1991, Frizell en 1992 y Chamani y Rajaratnam en 1999. Esta corriente de pensamiento continuó por varios años, lo que

incluyó discusiones por Chanson en 1994 y Matos y Quintela en 1995. El método preferido de representación para la disipación de energía ha evolucionado desde la comparación con la carga teórica disponible, presentando hoy en día la disipación de energía en términos de carga residual de energía al pie del vertedor (Frizell, 2006).

En 1990 Rajaratnam analizó las características principales del flujo rasante en vertedores escalonados, usando la información de Sorensen. Donde fue encontrado que el coeficiente de fricción C_f varía de 0.11 a 0.20, con un promedio de 0.18, incrementando hasta 0.27 para descargas pequeñas. Este efecto fue explicado con los diferentes tipos de regímenes, el primero siendo rasante y el segundo escalonado. La pérdida de energía adicional debido a la presencia de los escalones esencialmente dependía del cuadrado del número de Froude en la base del vertedor. También definió de manera precisa el punto en el cual comienza el flujo rasante con base en la información de 1978 de Essery y Horner. Colaborando gran parte de estos hallazgos con otros resultados por parte de Stephenson. Estos resultados por supuesto han sido sometidos a modificaciones en las últimas tres décadas, en gran parte al desarrollo de la instrumentación y control, y al incremento de la actividad de desarrollo en el campo de la ingeniería hidráulica (Hager y Pfister, 2013).

En 1990 Falvey definió el comienzo de la cavitación como función de la velocidad, presión y densidad del agua. Por lo tanto, el sistema debe fluir a una velocidad específica antes de desarrollar problemas relacionados a la cavitación. La mayoría de la investigación en este campo se ha conducido en pendientes pronunciadas porque están generalmente asociadas con obras de mayor tamaño que tendrían energía disponible para producir velocidades capaces de ocasionar efectos de cavitación (Frizell, 2006).



Fotografía 12. Vertedor de la presa de Oroville, Estados Unidos.



Fotografía 13. Vertedor de la presa de Oroville, después de sufrir daños ocasionados por un problema de cavitación.

En 1991 Stephenson hizo recomendaciones iniciales para alturas óptimas de escalón. Determinó la altura óptima del escalón en flujo rasante uniforme para ciertas pendientes pronunciadas. En contraparte, otros investigadores han confirmado que para flujo rasante uniforme, la altura del escalón no es un factor relevante; entre ellos Boes, Hager y Matos (Frizell, 2006).

En 1991 Wood desarrolló una ecuación para determinar la densidad de la mezcla o concentración de aire como función de la pendiente, concentración de aire, difusividad de turbulencia y caída de velocidad en las gotas de agua. Previo a esto, la distribución de aire sobre la superficie del vertedor había sido bien documentada por Straub, Anderson y Cain (Frizell, 2006).

A partir de estudios realizados del año 1994 al año 2001 por parte de Chanson es que se han propuesto fórmulas para la predicción de la ubicación del punto de inicio de la autoaireación de vertedores escalonados, al igual que sus propiedades de flujo; válidas para una amplia gama de pendientes. El punto de inicio es un parámetro valioso, ya que la cavitación no debería ocurrir una vez que el aire está cerca de la superficie escalonada y el flujo es autoaireado; la ubicación del punto de inicio en vertedores escalonados está más cerca de la cresta del vertedor en pendientes suaves debido al crecimiento de la superficie libre. Matos y Chamani obtendrían más tarde formulas relacionadas con las pendientes más comunes en vertedores escalonados construidos con Concreto Compactado con Rodillo, ambos en el año 2000 (Frizell, 2006).

En 1997 Ohtsu y Yasuda estudiaron la cantidad de burbujas de aire en la zona de recirculación del escalón, aclarando que suficiente aire en la zona de recirculación cerca de la cara del escalón puede prevenir el comienzo de la cavitación. Matos y otros profesionales estudiaron el mismo aspecto en el 2001 (Frizell, 2006).

En el año 2000 un documento por Pinheiro y Fael detallaba de manera resumida las ecuaciones propuestas en relación al inicio del flujo rasante en vertedores escalonados, en especial en términos de la relación de la profundidad crítica a la altura de escalón como función de la pendiente del vertedor. Mientras que el resto de ecuaciones son presentadas por múltiples autores, y comparadas con sus trabajos con menores pendientes. También sintetizó y comparó las características de disipación de energía en flujos de escalón a escalón, donde concluyó que la ecuación presentada en 1994 por Charmani y Rajaratnam proveía la mejor opción entre las ecuaciones presentadas (Frizell, 2006).

Matos en el año 2000 logró describir las condiciones de flujo bajo un vertedor escalonado conforme la capa límite crece hasta la aireación de la superficie libre, y cómo el flujo es alterado en relación a la aireación; en este mismo año formuló dos ecuaciones para calcular la concentración media de aire en el punto de inyección, con las que demostraba que la concentración media de aire en este punto no estaba relacionada con la altura de los escalones sino con la pendiente del vertedor escalonado. En 1999 ya había señalado las regiones de flujo con comparaciones de observaciones visuales de profundidad, velocidad y concentraciones de aire medidas en laboratorios. También en este año, presentó información y ecuaciones para predecir la concentración media de aire en las regiones de flujo con cambios rápidos y graduales; esto ayudó a definir si las condiciones de equilibrio y uniformidad, es decir, velocidad y concentración de aire, habían sido alcanzadas en el vertedor escalonado para condiciones de flujo rasante. Gracias a esto, en 1991, Hager creó una ecuación simplificada para la predicción de la concentración media de aire en flujos uniformes; la cual puede ser usada para determinar la profundidad de agua limpia y características de disipación de energía respectivamente (Frizell, 2006).

Comprender las variables involucradas es crítico para determinar la energía residual de un vertedor escalonado, como lo son la fricción o los efectos de aireación. En el año 2000, Chanson estableció que la diferencia entre vertedores lisos y vertedores escalonados es que en vertedores lisos predomina la fricción entre el flujo y el fondo del canal, y en vertedores escalonados predominan otros mecanismos como los vórtices recirculantes y la capa límite. A pesar de ello el factor de fricción de Darcy-Weisbach es el parámetro aceptado que se usa para determinar la disipación de energía (Frizell, 2006).

En cuanto a efectos de escala y estudios de modelos hidráulicos, Boer en el año 2000, resumió estudios presentados. Algunas de las conclusiones fueron que la mayoría de los modelos hidráulicos se basan en la similitud de Froude, que replica las fuerzas gravitacionales, aunque desafortunadamente las fuerzas viscosas no pueden ser ignoradas al modelar flujos aireados altamente turbulentos; y por ello se debe considerar al determinar la escala de un modelo de vertedor escalonado por Froude. Otros investigadores han estudiado los efectos de escala en vertedores escalonados desde entonces, entre los que destacan Hager, González, Chanson y Takahashi (Frizell, 2006).

Un flujo altamente aireado en un vertedor escalonado puede ser usado para mejorar la calidad en proyectos donde existe un bajo oxígeno disuelto o condiciones saturadas de flujo. Éstas en principio parecen metas distintas, pero el propósito común sería producir un flujo aireado cercano a los niveles de saturación al pie del vertedor escalonado y así prevenir el hundimiento del flujo a profundidades más bajas del canal, potencialmente causando niveles supersaturados de gases disueltos. En 2001, McKenna condujo estudios en modelos a escala, para evaluar la transferencia de eficiencias en vertedores de superficie lisa; tomando medidas totales de gas disuelto en diferentes puntos del sistema. Donde concluyó que un vertedor escalonado es más

eficiente en la transferencia de gases disueltos que un vertedor liso y que el caudal y la caída tienen mayor relevancia en la tasa de transferencia que la altura del escalón. Toombes y Chanson llevaron a cabo estudios similares en el año 2000 y 2002 sobre la transferencia de gases en regímenes de flujo escalonado para mejorar la calidad del agua (Frizell, 2006).

Los trabajos prácticos más importantes de vertedores escalonados son aquellos que presentan el apropiado uso de técnicas para determinar profundidad de flujo, concentración de aire, velocidad, cálculo de energía residual y un correcto escalamiento de los efectos de aireación. Entre estos estudios destacan los de Matos et al., Boes et al., Chanson et al., desde el año 2000 hasta el 2006, y el realizado por Andre en el 2004 (Frizell, 2006).

Con respecto a la manipulación de la turbulencia en vertedores escalonados, en 2004, González y Chanson hacen referencia al uso de veletas, las cuales fueron colocadas paralelas al flujo en el desnivel entre escalones. Añadido a eso, André en 2004 investigó el uso de alféizares y juegos de bloques espaciados para producir más turbulencia, y por lo tanto disipación de energía en los vertedores escalonados. Ambos investigadores afirman que más energía es disipada debido a las estructuras adicionales. Aunque falta que estos principios sean aplicados en la construcción de una obra de excedencias real (Frizell, 2006).

Amador en 2005 discute la probabilidad de obtener presiones lo suficientemente bajas que puedan causar daño por cavitación en vertedores escalonados. En contraparte a trabajos presentados previamente por Diez-Cascon en 1991 donde se señala que la velocidad crítica sobre la cual puede suceder el fenómeno de cavitación se encontraba alrededor de 13.11 m/s de acuerdo a medidas tomadas en la cara de los escalones; o el trabajo de Mateos y Elviro en 2001 donde el valor hasta el cual la cavitación no es un factor importante es de 15 m/s (Frizell, 2006).

La condición actual del estado del arte de vertedores escalonados ha desarrollado grandes avances hacia la preparación de herramientas de diseño. Sin embargo, es necesario aclarar que se precisa más investigación para confirmar aspectos específicos del diseño de vertedores escalonados; así como de la incorporación de métodos para optimizar y mejorar su funcionamiento en general.

2.3 Método Constructivo

En presas de concreto o de gravedad, el uso de vertedores escalonados es muy común, en gran parte debido a que el método de colocación del Concreto Compactado con Rodillo es compatible con la superficie escalonada de la cara aguas abajo de la cortina de la presa. Además del CCR, diversas técnicas constructivas han promovido la propagación del empleo de los vertedores escalonados, como los son, los colchones “Reno” o los gaviones rip-rap (González y Chanson, 2007).

Otra aplicación trata de los vertedores de derrame en presas de materiales sueltos o enrocamiento. Este concepto consiste en colocar escalones de CCR o bloques de concreto prefabricado sobre la cara aguas abajo de la cortina de estas presas, para que una sección o toda la cortina funcione como vertedor al ser rebasada. Las ventajas de este concepto son la rapidez de colocación, su bajo costo y la posibilidad de construcción sin interferir en la operación del embalse (González y Chanson, 2007).

2.3.1 Gaviones de Riprap

Los gaviones son contenedores rellenos de rocas o materiales más finos, empleados en la construcción de estructuras como presas, muros de contención, obras de excedencia, saneamiento de vías férreas, revestimiento de canales, etc. (Mawlood y Peerdawood, 2010). Suelen estar contruidos con malla hexagonal de doble o triple torsión, soldada o tejida; la malla soldada esta normalmente galvanizada para reducir la corrosión, pero también puede estar recubierta de polímeros u otros materiales. Tienen una vida útil de al menos 50 años.

Fueron usados por varios milenios en Egipto y China, previos a 1879 eran contruidos con materiales de plantas, lo cual limitaba drásticamente su vida útil (Mawlood y Peerdawood, 2010). El gavión como se le conoce en la actualidad fue desarrollado en 1893 por la empresa italiana Ditta Maccaferri a partir de un negocio tradicional artesanal que crece para transformarse en un emprendimiento industrial. Creado para ejecutar obras de protección hidráulica a lo largo del río Reno, en Casalecchio di Reno, región de Bologna. En 1907 los modelo de gaviones en saco fueron seguidos por el nuevo diseño en forma de caja, el cual fue utilizado en muchas grandes obras públicas, en particular en el rio Tiber, en el rio Arno y en Sicilia.

El componente de relleno o riprap, normalmente consiste de rocas, pero otros materiales como ladrillos, concreto triturado e incluso cantera plana han sido empleados para rellenar las cajas o canastas (Mawlood y Peerdawood, 2010). En general se suele priorizar cualquier material que se pueda obtener de las inmediaciones de la obra. El relleno de los gaviones es de un material pétreo bien graduado, con tamaño nominal de 100 mm a 200 mm, donde entre más angular sea el material, mejor será el entrelazado y por lo tanto ocurrirá una menor deformación de la cara de la estructura.

Algunas de las ventajas que ofrecen los gaviones es que tienen gran adaptación al terreno, son de fácil diseño y rápido montaje, no requieren de

mano de obra especializada o cimentación, trabajan por gravedad y son económicos. Además, presentan propiedades sumamente drenantes, flexibles, durables, resistentes y ecológicas (Bianchini, 2018).

El proceso de su montaje consiste en lo siguiente:

1. La malla es desplegada, abatiéndola en el suelo para formar cajas. A continuación las aristas son entrelazadas con alambre galvanizado.
2. Una vez armado el gavión, es situado en el lugar de la obra. Y es atado al resto de gaviones contiguos con alambre galvanizado y torsiones entre mallas.
3. El gavión es rellanado con roca, ladrillo, cantera, etc. Esto puede ser por medios mecánicos, tales como, excavadoras, cintas transportadoras o retroexcavadoras.
4. El gavión es cerrado con ataduras de alambre galvanizado. Procurando la coincidencia entre las diferentes aristas de la tapa con los bordes de las caras del gavión.

Constituyen una de las soluciones más aplicadas a medios hidráulicos, donde su resistencia y versatilidad son aptas para todo tipo de situación, desde el origen de un cauce hasta su eventual desembocadura.

2.3.2 Colchones Reno o Colchones de gaviones

Desarrollados después de la Segunda Guerra Mundial, por parte de la empresa Maccaferri, la misma empresa que años atrás había creado al gavión moderno. La idea de los colchones Reno parte de los gaviones y su uso es muy similar, debido a que el principio bajo el cual funcionan es exactamente el mismo.

El colchón Reno es una estructura hecha de malla hexagonal de alambre doblemente torcido. Son rellenos con rocas en el sitio del proyecto para formar una estructura monolítica flexible y permeable (Maccaferri, 2015). Suele ir recubierto de argamasa, la cual es un tipo de mortero compuesto por cemento, cal, arena y agua; en algunos casos se excluye el cemento.



Fotografía 14. Colchones reno.

Está compuesto por una base y una tapa. Debido a su estructura en celdas, puede ser colocado con múltiples configuraciones, lo que le permite ser doblado para tomar la forma necesaria de la obra.

El revestimiento de la superficie de los canales en vertedores escalonados es utilizado para mejorar el régimen de escurrimiento, y obtener de esta manera un saneamiento básico adecuado. Al igual que los gaviones producidos en malla hexagonal de doble torsión, son capaces de proporcionar una serie de ventajas que los vuelve en muchos sentidos únicos, comparados con otras soluciones. Cuando el caudal de la obra de excedencia debe ser evacuado

por un canal de secciones limitadas, o donde la topografía permita solamente pequeñas pendientes, la aplicación de mortero sobre los revestimientos con colchones Reno es utilizada con gran éxito; gracias a que se obtiene una reducción en el coeficiente de rugosidad, lo cual permite mayores velocidades de escurrimiento con una consiguiente reducción de las dimensiones de la sección hidráulica y del volumen de sedimentación (Maccaferri, 2017).

Esta solución garantiza también la impermeabilidad del revestimiento y minimiza el crecimiento de la vegetación. Posibilita también la limpieza con procesos mucho más simples y en algunos casos la propia autolimpieza (Maccaferri, 2017).

Se emplean en terrenos con baja capacidad de soporte, donde el revestimiento con colchones Reno argamasados forma una estructura semiflexible, que puede absorber asentamientos del suelo sin perder su función estructural. La propia tapa del colchón Reno sirve de armadura para la argamasa. La malla del colchón Reno queda incorporada a dicho mortero y, debido a su forma hexagonal, ofrece excelentes garantías estáticas, una vez que el acero está dispuesto en las direcciones de las tensiones. Siendo así, en paridad de área de acero por metro cuadrado, la estructura hexagonal de la malla es más eficaz en la absorción de los esfuerzos y distribución de las tensiones; comparada a las mallas electrosoldadas de estructuras cuadrada y rectangular (Maccaferri, 2017).

Algunos de los problemas que presenta son los relativos al drenaje, en específico al alivio de la subpresión y a los efectos de dilatación, que pueden ser solucionados mediante la utilización de juntas que se separan cada dos metros. Dichas juntas son colocadas durante la aplicación de la argamasa, al dejar piezas de madera transversales al canal, que son retiradas antes del fraguado total del mortero; de esta forma se obtiene al mismo tiempo, drenes

y juntas de dilatación. Esto elimina la subpresión y vuelve semiflexible a la estructura, lo que le permite al colchón Reno absorber pequeños movimientos generados por los asentamientos del suelo. En los canales de irrigación, todas las juntas deben ser rellenadas con asfalto para garantizar la total impermeabilización. En lugares en los que el agua o el suelo sean químicamente agresivos, los colchones Reno producidos con acero revestido con aleación de zinc (95%) y aluminio (5%), protegidos con un revestimiento plástico de policloruro de vinilo (PVC) que garantizan la durabilidad e integridad de la estructura (Maccaferri, 2017).

Su proceso constructivo consiste en lo siguiente:

1. Después de la regulación del fondo y de los taludes, se procede a la colocación de los colchones Reno.
2. Los colchones se rellenan totalmente con material rocoso de tamaño adecuado y se colocan sus respectivas tapas, las que son posteriormente amarradas a los bordes de los colchones y a los diafragmas. En caso de que el suelo base no tuviera buenas condiciones de soporte o fuera de una granulometría fina, se recomienda la colocación de un filtro geotextil o graduado, entre el suelo y el colchón Reno.
3. Posterior al cierre de los colchones Reno, se colocan piezas de madera que servirán como guía para definir el espesor.
4. Con el propósito de minimizar el volumen de mortero, deben colocarse rocas de menor granulometría sobre los colchones Reno terminados, suficiente para que las tapas queden envueltas por la misma.
5. Antes del fraguado del mortero, los listones de madera son retirados.

La ejecución de este tipo de revestimiento es muy simple y rápida, eliminando cimentaciones costosas y lentas, cambio de suelo y la utilización de equipos especiales. En los canales trapezoidales la máxima inclinación recomendada para las márgenes es de 1:1.5 y con un espesor de colchón

Reno de 0.17 m o 0.23 m. Incluso si se ocupa mano de obra no calificada con el auxilio de equipos mecánicos leves, la productividad media para las operaciones de montaje, colocación en obra, amarre de elementos adyacentes, llenado y cierre es de aproximadamente 3 m²/hombre/hora. Mientras que la productividad media para la ejecución del revestimiento de mortero es de 10 m²/hombre/hora (Maccaferri, 2017).

Otras de sus muchas aplicaciones son para revestimiento de canales, defensas fluviales, estabilización de taludes, saneamiento de vías férreas, contención de desprendimientos, diques de corrección y plataformas de cimentación (Bianchini, 2018).

2.3.3 Concreto compactado con rodillo

Las primeras aplicaciones del concreto compactado por rodillo en la construcción de presas se remontan a 1960 en Taiwan, donde se utilizó para el cuerpo del vertedor de la presa Shihmen. Pero es quizá entre 1974 y 1975 en la reconstrucción de la presa de Tarbela en Pakistán cuando hace su ingreso como una material viable en la construcción de presas (Londoño y Cipriano, 1992). Años más tarde Willow Creek sería la primera gran presa de concreto compactado por rodillo (CCR), construida en 1983 en el estado de Oregón de los Estados Unidos de América. Y a partir de su apertura se han registrado una rápida expansión de esta tecnología en el mundo; a finales de 1986 sólo se habían acabado 15 presas de CCR, para el año 2002 ya existían 251 presas en operación y 34 en construcción de este mismo tipo (Amador et al., 2006).



Fotografía 15. Vertedor escalonado de la presa Thomaston, construido con CCR.

Los principales métodos constructivos con CCR utilizados para la formación de vertedores son:

- Concreto de paramento compactado contra encofrado.
- CCR contra encofrado.
- Concreto armado colocado después de CCR.
- Elementos ejecutados con bordilladora.

Definición

De acuerdo al Instituto Americano del Concreto (ACI) el concreto compactado por rodillo (CCR) es un concreto sin revenimiento, que en su

estado no endurecido es típicamente transportado, colocado de manera continua y compactado usando un rodillo de compactación. Usualmente es mezclado usando un equipo de dosificación y mezcla continúa de alta capacidad, entregada por camiones y esparcido por excavadoras, en capas, previo a la compactación con rodillos vibratorios (ACI, 2011). Se clasifica como material debido a que su dosificación, técnica y consistencia difieren del concreto convencional.

En el mundo se usan diferentes nomenclaturas para referirse al concreto compactado con rodillo: R.C.C. (Roller Compacted Concrete) en Estados Unidos, R.D.L.C. (Roller Dry Lean Concrete) en Inglaterra, R.C.D. (Roller Compacted Dam) en Japón, B.C.R (Beton Compacte au Rouleau) en Francia, H.C.R. (Hormigón Compactado con Rodillo) en España, C.C.R (Concreto Compactado con Rodillo) en Latinoamérica entre otros. Aunque de manera común también se le llama Rollcrete.

Antecedentes

El CCR se deriva principalmente de dos técnicas de la construcción, el suelo-cemento y el concreto pobre, ya que se podría decir que es el resultado de tomar lo mejor de cada una de estas técnicas. Gracias a esto la aceptación del material fue rápida, dado que no fue necesario desarrollar equipos especiales para el mezclado, transporte y colocación del material, como tampoco para el control de campo o pruebas de laboratorio (Londoño y Cipriano, 1992).

Su uso ha permitido que múltiples nuevas presas y vertedores se hayan vuelto económicamente factibles debido a la reducción de costos ocasionados por su rápido método constructivo. También ha creado la

oportunidad de rehabilitar de manera económica estructuras de concreto existentes; que tengan problemas de estabilidad y necesiten apuntalamiento, además de mejorar las condiciones de estructuras con condiciones inadecuadas de capacidad de descarga al proveer una manera en la cual lo puedan hacer de manera segura (ACI, 2011).

Es actualmente el material más utilizado en el mundo para la construcción de presas de gravedad, por la gran cantidad de ventajas técnicas y económicas que aporta. Capaz incluso de competir con las presas de gravedad en materiales sueltos (Santaella, 1999). También se usa en pavimentos, pistas de aeropuertos, helipuertos, ataguías, reparación de taludes, entre otros.

Su desarrollo se debe en gran medida a que en las últimas dos décadas los costos de construcción han disminuido, el desarrollo de equipos de mezclado, transporte, compactación, y del uso de conglomerantes de bajo calor de hidratación que han permitido un avance significativo de la técnica (Santaella, 1999).

En el mundo de las presas de concreto convencional, aquellas con una altura mayor a 15 m, presentaban un descenso del 22%, todo esto desde 1950 hasta 1982; se debía en buena parte a la presencia de presas construidas con materiales sueltos o enrocado. Ya que se logró el perfeccionamiento en la época, de equipos capaces de mover grandes volúmenes de material, compactar suelos y material granular con excelentes rendimientos, bajando de esta manera los costos (Santaella, 1999). A pesar de ello las presas de materiales sueltos tienen una serie de desventajas:

- Erodabilidad del material ante la ocurrencia de una creciente que sobrepase la cresta de la presa.
- Requiere una construcción independiente del vertedor, tomas y descargas de fondo.
- Gran cantidad de material necesario, debido a su sección trapezoidal.

Por consiguiente, en los años 60, al combinarse las ventajas de utilizar los grandes equipos disponibles de transporte y colocación de la puesta de obra de las presas de materiales sueltos con las ventajas del concreto como material de construcción, dan origen a lo que hoy se conoce como Concreto Compactado con Rodillo (Santaella, 1999). Con base en lo anterior, es que varios expertos en presas de la década de los ochenta se proponen el uso de CCR como una opción segura, rápida, económica y técnicamente apta para la construcción y rehabilitación de presas (Santaella, 1999). Especialmente en el aspecto económico, existen diferencias a favor del CCR en comparación con el concreto convencional, que son la economía de la puesta en obra debido a la reducción de formaletas y juntas, así como economía en el tiempo de construcción por el uso de maquinaria pesada.



Fotografía 16. Vertedor escalonado de Concreto Compactado con Rodillo en la presa de control del río North Para.

Algunas de las ventajas económicas que el CCR proporciona en comparación con los materiales sueltos son:

- El vertedor se puede construir dentro de la presa, eliminando la necesidad de un canal lateral convencional que se construye en presas de materiales sueltos, involucrando costos extra de excavación y problemas relativos a la estabilidad de taludes (Santaella, 1999).
- Las torres de toma pueden anclarse al paramento de aguas arriba de las presas, en lugar de ser estructuras aisladas (Santaella, 1999).
- La altura de la ataguía y la sección de los conductos de desvío, pueden ser diseñados para crecientes con menores periodos de retorno (Santaella, 1999).

Materiales

Los materiales usados para el CCR incluyen cementantes o conglomerantes, agregados, agua, y aditivos, una gran gama de materiales han sido empleados a lo largo de la historia para obtener mezclas efectivas de Concreto Compactado con Rodillo. Con el expreso propósito de obtener diferentes resultados adecuados a condiciones específicas de trabajo que incluyen consideraciones de distancia de traslado, propiedades, costos, entre otros.

Conglomerante o cementante

Es un material inorgánico o una mezcla de materiales inorgánicos que crea y desarrolla fuerza mediante reacciones químicas con el agua, debido a la formación de hidratos, siendo capaz de realizar este proceso bajo el agua (ASTM, 2000).

El tipo y cantidad de cemento portland o cemento adicionados con puzolanas requerido en mezclas de CCR depende invariablemente de el volumen de la estructura, propiedades requeridas y las condiciones de exposición; así como la consideración del calor de hidratación ya que la mayoría de presas son lo suficientemente grandes como para tomarse en cuenta. El contenido de cementantes usado en presas de CCR ha variado de 60 kg/m³ de la presa de Urugua-í en Argentina hasta 248 kg/m³ de la presa de Upper Stillwater en Estados Unidos. Y con una cantidad de puzolanas del veinte al treinta por ciento del peso del material cementante (Hansen y Reinhardt, 1991).

Algunos de los cementos con bajo calor de hidratación empleados en presas masivas de Concreto Compactado por Rodillo son los de moderado calor (ASTM Spec. C150, Tipo II) mayormente empleados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, cemento Portland-Puzolana (ASTM C595, Tipo IP) y cemento Portland de escoria de alto horno (ASTM C595, Tipo IS). De tratarse de cemento expuesto a químicos agresivos se pueden usar cementos resistentes a sulfatos (ASTM C150, Tipo V). La selección de puzolanas adecuadas para su uso en CCR debería basarse en los estándares de la ASTM C618 (Hansen y Reinhardt, 1991).

Agregados

Material granular como arena, grava, piedra pulverizada, usado con un medio cementante para formar concreto o mortero. Los agregados se dividen principalmente en gruesos y finos, siendo las gravas los primeros y las arenas los segundos; ambos son el resultado de la desintegración natural y abrasión de rocas (ASTM, 2000).

Para el Concreto Compactado con Rodillo así como para el concreto convencional, la calidad y graduación de los agregados son factores importantes que influyen en el producto final. La función de la estructura en su totalidad y los requerimientos mínimos de las propiedades del concreto deberían determinar los agregados a escoger (Hansen y Reinhardt, 1991).

En algunas instancias, agregados producidos para aplicaciones distintas al concreto pueden ser usados en el CCR, entre los que destacan, gravas con drenaje libre producidas para una zona en una presa de terraplén con una base de grava gruesa y un agregado producido para pavimentos de asfalto, ambos han sido usados para algunos proyectos pequeños (Hansen y Reinhardt, 1991).

Existen algunas características cuyos estándares son de crucial importancia durante el proceso de selección de agregados para el Concreto Compactado con Rodillo en presas, siendo: graduación (ASTM C136 y ASTM C117), resistencia a la abrasión (ASTM C131, ASTM C535, ASTM C295), densidad relativa y absorción (ASTM C127 y ASTM C128), densidad aparente (ASTM C29), resistencia a sulfatos (ASTM C88) e impurezas orgánicas (ASTM C40) (Hansen y Reinhardt, 1991).

Agua

El principal requerimiento para el agua como componente del Concreto Compactado con Rodillo es que ésta esté libre de cantidades excesivas de materiales que le impidan alcanzar la fuerza apropiada.

Aditivos

Es un material distinto al agua, agregados, material cementante, o fibras que es usado como ingrediente de una mezcla cementante para modificar sus propiedades de endurecimiento o fraguado; son añadidos antes o durante el proceso de mezcla (ASTM, 2000).

Aditivos tales como inclusores de aire, reductores de agua o retardantes han sido incluidos en mezclas de Concreto Compactado con Rodillo con poco éxito. Con algunas excepciones como en la presa Elk Creek que empleó una mezcla con aditivos reductores de agua y retardantes o en las mezclas japonesas que utilizan aditivos reductores de agua e inclusores de aire en todas sus mezclas; donde una dosis relativamente alta de 0.87 a 1.3 kg por 100 kg de cemento portland demostró buenos resultados (Hansen y Reinhardt, 1991).

Clasificación

La rápida aceptación a nivel mundial del concreto compactado por rodillo es el resultado de sus ventajas económicas y de su excelente desempeño. Cabe aclarar que no todos los concretos compactados cuentan con características y propiedades idénticas, debido a la variación que puede existir en sus relaciones de material cementante, comportamiento en estado suelto, porcentaje de humedad, entre otros.

Existen dos filosofías distintas con respecto a los métodos de diseño de mezcla de Concreto Compactado con Rodillo:

- El planteamiento de concreto.

- El planteamiento de suelos o geotécnico.

Las mezclas de CCR en las que se usan métodos de diseño de concreto generalmente tienen una consistencia más fluida y una mayor trabajabilidad que aquellas desarrolladas con un enfoque de suelos; ambas filosofías producen un concreto sin asentamiento (USBR, 2017).

En cuanto a efectos prácticos y de simple clasificación, se han desarrollado dos tipos de escuelas:

- **Bajo contenido de pasta.** Cuentan con un bajo desarrollo de calor durante el proceso de hidratación, alta permeabilidad, densidad moderada, concreto poco trabajable, controles menos exigentes durante la construcción y necesitan diferentes sistemas para lograr la impermeabilidad de la pantalla (Londoño y Cipriano, 1992).
- **Alto contenido de pasta.** Presentan un alto calor de hidratación, alta densidad, permeabilidad reducida, concreto trabajable, requieren mayores controles durante el proceso constructivo y no necesitan ninguna obra adicional para lograr la impermeabilidad (Londoño y Cipriano, 1992).

Los informes económicos de las presas construidas con CCR aseguran que las construidas con un alto contenido de pasta son más económicas, debido a la menor cantidad de obras adicionales necesarias para lograr la impermeabilización y a que las pendientes de las caras de la cortina son más altas, que como consecuencia requiere menores volúmenes de mezcla (Londoño y Cipriano, 1992).

Consideraciones

La calidad de la producción y colocación del Concreto Compactado con Rodillo está directamente relacionada al equipo y experiencia del personal de construcción, así como con el control de calidad del proyecto y las medidas de garantía de calidad. El contratista normalmente tiene que desarrollar, implementar y mantener un sistema de control de calidad, el cual incluye pruebas de propiedades de materiales de concreto, calibración de equipo, pruebas de control de calidad de Concreto Compactado con Rodillo fresco y endurecido, y una comunicación en tiempo y forma de resultados de dichas pruebas (USB, 2017). Todo lo anterior está sujeto a regulaciones federales, que requieren de funcionarios gubernamentales que provean garantía de calidad en todo el trabajo de construcción.

La habilidad del equipo para maniobrar en la presa durante la construcción siempre debe ser considerada durante el colocado del concreto. La parte superior de la cortina debe tener suficiente anchura para alojar al equipo de construcción encargado de transportar, colocar y compactar el CCR. Una anchura mínima de 20 pies debe ser considerada para permitir al equipo de construcción maniobrar y en casos de emplear equipos de mayor tamaño, una anchura de 25 pies o mayor permitiría mejorar la velocidad de compactación y colocación (USB, 2017).

La durabilidad es la especificación más importante que debe cumplir el paramento del vertedor. El material que constituye los escalones del vertedor estará sujeto al deterioro provocado por los agentes meteorológicos y a las sollicitaciones hidrodinámicas del vertido por coronación (Amador et al., 2006).

Las propiedades del material que más directamente están relacionadas con la durabilidad son el peso específico, resistencia a compresión y, en climas

fríos, resistencia al hielo y deshielo. El peso específico del Concreto Compactado con Rodillo es de alrededor de 24 KN/m^3 igual que el concreto convencional. La resistencia a compresión depende del contenido de conglomerante, con un rango comprendido entre 5 y 15 MPa para un CCR con bajo contenido de conglomerante o pasta, y de 15 a 30 MPa en el caso de CCR con alto contenido de conglomerante (Amador et al., 2006).

La excesiva percolación a través de las juntas horizontales entre tongadas del CCR y las fisuras son dos problemas que pueden darse en algunas obras de CCR construidas y que pueden afectar el funcionamiento del vertedor. En especial para las obras de CCR con bajo contenido de pasta, las juntas horizontales entre tongadas son bastante permeables, ya que las juntas constituirán caminos preferenciales para la transmisión de subpresiones al paramento de aguas abajo; en estos casos se deben prever sistemas de drenaje que recojan dichas filtraciones y las conduzcan fuera de la estructura antes de que alcancen el paramento aguas abajo (Amador et al., 2006).

Las características hidrodinámicas del flujo sobre posibles fisuras existentes en los peldaños pueden crear un sistema de resonancia: las fluctuaciones de presión proporcionan la excitación necesaria, mientras que el volumen el volumen de resonancia, por lo que es relevante conocer las frecuencias fundamentales de resonancia del sistema. Si el espectro de las presiones del vertido tiene suficiente energía en el rango de dichas frecuencias, el sistema será estimulado hasta resonancia, ocurriendo una amplificación indeseable de las presiones hidrodinámicas en el interior de las fisuras (Amador et al., 2006).

2.4 Diseño de un vertedor escalonado

Una ventaja fundamental de emplear una estructura escalonada como obra de descargas es en principio el ahorro de tiempo en la culminación de la obra, debido al sistema constructivo de CCR (Concreto Compactado con Rodillo) que permite puestas en obra más versátiles, aunque cabe aclararse que esto a su vez conlleva restricciones en la altura del escalón por medio del calor de hidratación del concreto que limita la altura de la tongada (Rendón, 2011).

Independiente de las circunstancias estructurales o constructivas, una rápida escalonada permite indistintamente un incremento sustancial de disipación de energía al paso de sus escalones con respecto a los de una rápida lisa. Por lo que la disipación de energía en el flujo de vertedores escalonados es uno de los aspectos más importantes, estudiados y analizados. Estableciendo que en este tipo de estructuras la disipación depende de la altura de la cortina, es decir que a mayor altura mayor disipación; también el gasto unitario en relación con el tamaño del escalón es un factor que influye de forma interrelacionada con el anterior (Rendón, 2011).

El diseño de un vertedor escalonado así como el de otro tipo de estructuras, debe ser desarrollado y analizado para el caso más desfavorable; que en este caso es el de un gasto máximo. El procedimiento de diseño de un vertedor con flujo rasante, se basa principalmente en la altura de la presa y la pendiente de la rápida. Donde se establecen algunos parámetros importantes; el gasto de diseño, tirante crítico en el cimacio o al inicio del vertido y la altura de escalón (Rendón, 2011).

La importancia de seleccionar un tirante crítico al inicio del vertido, es por la relación que se tiene entre la altura de escalón y la disipación de energía al final de la rápida, recordando las siguientes restricciones:

$$\frac{P}{y_c} < 10 \quad \text{y} \quad \frac{P}{y_c} < 8 \quad (1)$$

Dónde:

- p es la altura de la cortina (m).
- y_c es el tirante crítico (m).

La primera expresión siendo de Mateos y la segunda de Sandeep y Ramesh.

Ya que esas relaciones se darían en presas de pequeña altura con grandes gastos y pequeños escalones, donde la disipación de energía sería similar a la obtenida en un vertedor liso. Por lo que sería necesaria la utilización de otro tipo de estructura. Y de construir escalones más pequeños, estos definirán el inicio de la aireación en el flujo, en base a la rugosidad que se le dé a la rápida (factor k) que establecerá directamente el tipo de flujo que se presente.

2.4.1 Anchura del vertedor y diseño de la cresta

El primer paso del diseño consiste en el estudio hidrológico de la cuenca que permita estimar las avenidas para diferentes periodos de retorno que pueden llegar al embalse. En el caso de vertedores no controlados por compuertas una vez fijado el hidrograma de entrada, el hidrograma laminado de salida será función del volumen de embalse por encima del umbral del vertedor y del caudal designado por el mismo (Amador et al., 2006). El caudal de diseño (Q_{dis}), corresponde al máximo del hidrograma de salida.

La elección del ancho del vertedor tendrá en consideración la longitud de coronación de la presa, la anchura del río aguas abajo y la posible reducción de la anchura efectiva debido a la existencia de estribos y pilas (Amador et al., 2006).

El coeficiente de descarga depende de la forma de la cresta. Y está en función del cociente entre la altura total sobre la cresta (E) y la de diseño de perfil (E_{dis}), de la altura del vertedor (H) y de la inclinación del parámetro de aguas arriba del vertedor. La presencia de los escalones afecta el campo de presiones sobre la superficie inferior de la lámina de agua, y su influencia en el coeficiente de descarga aún no es del todo conocida (Amador et al., 2006).

Chanson sugiere que una solera de cresta ancha horizontal constituye una solución preferible, ya que facilita la construcción de la presa. Esta solución permite la operación de camiones de transporte y rodillos vibratorios utilizados en la compactación del concreto (Amador et al., 2006).

Los vertedores escalonados controlados por compuertas no son muy frecuentes dada la limitación al caudal unitario que presenta este tipo de estructuras hidráulicas.

2.4.2 Altura de los peldaños

La construcción con Concreto Compactado con Rodillo implica la ejecución de tongadas de poco espesor sobre superficies extensas. La mayoría de las tongadas utilizadas en presas de CCR tiene un espesor de 0.3 m. Por lo tanto, la altura de los escalones del vertedor suelen ser múltiplos del espesor de la tongada, equivalente a alturas entre 0.3 m y 1.2 m. Para la selección del tamaño del peldaño dos aspectos hidráulicos se podrán tener en

consideración: el riesgo de cavitación y la disipación de energía a lo largo de la rápida (Amador et al., 2006).

La influencia del tamaño del peldaño en la disipación de energía a lo largo de la rápida es un asunto controversial, donde no existe todavía un consenso por parte de la comunidad científica (Amador et al., 2006)

En 2004 con base a los datos experimentales de Chamani, Rajaratnam, Boes, Yasuda y Chanson. Ohtsu et al. Proponen la siguiente expresión para una altura relativa de escalón (h/y_c) para la cual el factor de fricción f_e será el máximo.

$$\frac{h}{y_c} \geq 0.43 \quad (2)$$

Según Tozzi las alturas típicas de peldaños de 0.60 y 0.90 m se aproximan a la altura óptima (h_{opt}) para caudales unitarios de 10 y 15 m^2/s respectivamente. Mientras que los peldaños con altura de 0.90 y 1.2 m son los que se aproximan a h_{opt} para caudales de diseño entre 5 y 15 m^2/s de acuerdo a Ohtsu et al. (Amador et al., 2006).

Por lo contrario y de acuerdo con González & Chanson (2007), Chanson sugirió una altura máxima de escalón, para garantizar que la rugosidad sea eficiente (Rosado, 2017).

$$h \leq 15 \cdot y_c \cdot \cos(\theta) \quad (3)$$

2.4.3 Tipo de flujo

Dependiendo de la geometría del escalón y del caudal circulante se pueden encontrar distintos tipos de flujo sobre el vertedor escalonado. El flujo de escalón a escalón se caracteriza por una sucesión de caídas libres y ocurre

para bajas pendientes y bajos caudales unitarios. El flujo rasante, por su parte, se describe por una corriente que fluye sobre los vértices de los peldaños, por encima de un flujo secundario delimitado por las aristas del escalón y es más usual para pendientes y caudales unitarios elevados. Para caudales intermedios se identifica el llamado flujo de transición, que mantiene un comportamiento entre el flujo de escalón a escalón y el flujo rasante (Amador et al., 2006).

El flujo de escalón a escalón se encuentra limitado a bajos caudales unitarios en vertedores escalonados sobre presas de Concreto Compactado con Rodillo. Para los caudales de proyecto la situación más común será el flujo rasante en la estructura. Según Chanson, se deben evitar condiciones de diseño que conduzcan al flujo de transición, dadas las inestabilidades hidrodinámicas que en él se producen. No obstante, es inevitable la ocurrencia de dicho tipo de flujo si el vertedor escalonado está diseñado para funcionar en flujo rasante (Amador et al., 2006).

2.4.4 Características del flujo a lo largo de la rápida

Regiones del flujo rasante

El flujo rasante se puede dividir en un conjunto de regiones a lo largo de la rápida, principalmente tres: en la zona no aireada, flujo rápidamente variado, flujo gradualmente variado y uniforme. Las principales características del flujo rasante son la concentración media de aire (C_{med}), la energía residual (E_r), y la energía disipada (ΔE) (Amador et al., 2006).

Zona no aireada e inicio de aireación

La zona no aireada se caracteriza por el desarrollo en la dirección del flujo de la capa límite turbulenta, con un aumento continuo de su espesor. Fuera de la capa límite el flujo se considera irrotacional; cuando el espesor de la capa límite alcanza la superficie libre se produce el inicio de entrada de aire en el flujo (Amador et al., 2006).

Flujo rápido y gradualmente variado

La zona del flujo gradualmente variado se caracteriza por una variación gradual de los valores de concentración media de aire, tirante y velocidad hasta alcanzarse las condiciones de equilibrio del flujo uniforme (Amador et al., 2006).

Aguas abajo del punto de inicio de aireación se observa visualmente una importante deflexión de la lámina libre, la ondulación se propaga aguas abajo influenciando las características hidráulicas del flujo. En 1999 Matos comprobó experimentalmente que las líneas de corriente presentan una fuerte curvatura en esta zona, siendo inicialmente convexas, lo cual favorece una intensa aireación del flujo y posteriormente cóncavas sobresaliendo el movimiento ascensional de las burbujas de aire y que causa una caída localizada de la concentración media de aire (Amador et al., 2006).

Cabe aclarar que otros investigadores, como Boes y Hager, no identifican la región de flujo rápidamente variado. Su expresión para la evolución de la concentración a lo largo de la rápida muestra un crecimiento gradual hasta alcanzar las condiciones del flujo uniforme (Amador et al., 2006).

Flujo Uniforme

El flujo uniforme será alcanzado una vez que se establezca el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción. En esta zona del vertedor las principales características del flujo como la concentración media de aire, la velocidad media, la altura de agua y energía específica residual (Amador et al., 2006).

Es difícil determinar las condiciones hidráulicas para la formación del régimen uniforme, debido al carácter asintótico de las curvas de evolución de las características del flujo a lo largo de la rápida.

Boes y Hager proponen una expresión para determinar la altura mínima del vertedor (H_e) necesaria para la formación de un régimen uniforme:

$$\frac{H_e}{y_c} \approx 24 \cdot (\sin\theta)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

2.5 Procedimiento

En 2004 Ohtsu et al. Presentaron una metodología de diseño de vertedores escalonados con flujo rasante y pendiente entre 5.7° y 55°. Cabe resaltar que la propuesta de Ohtsu et al (Rosado, 2017). Está enfocada en el diseño de canales escalonados para la disipación de energía en presas compactadas con rodillo (CCR), el proceso de diseño consta de los siguientes pasos:

1. Con base en la información obtenida de estudios previos, se establecen los parámetros iniciales del vertedor:
 - Gasto de diseño (Q_{dis}).
 - Ancho del canal (B).
 - Pendiente del paramento aguas abajo (θ).

- Altura de la presa (P o Hdam).
2. Se calcula el parámetro adimensional P/y_c . Para que la energía disipada sea mayor que la presente en un vertedor de rápida lisa. Siendo posible tomar la relación $P/y_c < 10$ para diseño y la de $P/y_c < 8$ para revisión.
 3. Calcular la profundidad crítica del flujo. Considerando que el tirante crítico, debe de estar formado en función directa de la altura de la presa.

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{Q_{dis}^2}{B^2 \cdot g}} \quad (5)$$

Dónde:

- g es la gravedad (m/s^2).
 - Q_{dis} es el gasto de diseño (m^3/s).
 - B es el ancho de canal (m).
4. Suponer la altura de escalón y verificar que la relación h/y_c se encuentre en el rango

$$0.25 \leq \frac{h}{Y_c} \leq \left(\frac{h}{Y_c}\right)_s \quad (6)$$

$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_s = \frac{7}{6} (\tan\theta)^{1/6} \quad (7)$$

Dónde:

- h es la altura de escalón (m).
 - y_c es el tirante crítico.
5. Comparar la altura relativa del canal (P/y_c) con la altura relativa para que se forme flujo cuasi uniforme (H_e/y_c).

$$\frac{H_e}{Y_c} = \frac{\left(5.7 + 6.7 \exp\left(-6.5 \frac{h}{Y_c}\right)\right)}{-1.21 \cdot 10^{-5} \theta^3 + 1.6 \cdot 10^{-3} \theta^2 - 7.13 \cdot 10^{-2} \theta + 1.3} \quad (8)$$

Dónde:

- θ es el ángulo de la pendiente (Rad).
- y_c es el tirante crítico.
- h es la altura de escalón (m).

5.1. Si $P/y_c > He/y_c$, se presentará un flujo rasante cuasi uniforme; para este caso se deberá calcular el factor de fricción.

Para $5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$

$$f = f_{max} - A \left(0.5 - \frac{h}{y_c}\right)^2, \text{ para } 0.1 \leq \frac{h}{y_c} \leq 0.5 \quad (9)$$

$$f = f_{max}, \text{ para } 0.5 \leq \frac{h}{y_c} \leq \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad (10)$$

$$A = -1.7 \cdot 10^{-3} \theta^2 + 6.4 \cdot 10^{-2} \theta - 1.5 \cdot 10^{-1} \quad (11)$$

$$f_{max} = -4.2 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 1.6 \cdot 10^{-2} \theta + 3.2 \cdot 10^{-2} \quad (12)$$

Para $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$

$$A = 0.452 \quad (13)$$

$$f_{max} = 2.32 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 2.75 \cdot 10^{-3} \theta + 2.31 \cdot 10^{-1} \quad (14)$$

Dónde:

- θ es el ángulo de la pendiente (Rad).

5.2. Se debe tener en cuenta que el coeficiente de fricción depende del caudal y de la pendiente del canal, es decir, se debe calcular si se presentará un flujo rasante tipo SKA (Flujo sobre las aristas del escalón) o SKB (Flujo sobre la huella del escalón).

5.2.1. Calcule la profundidad media del flujo (d) y determine la velocidad media del flujo, mediante la ecuación de continuidad ($V=q/d$).

$$d = \sqrt[3]{\frac{q^2 \cdot f}{g \cdot \text{sen}\theta \cdot 8}} \quad (15)$$

Dónde:

- q es el gasto unitario ($m^3/s \cdot m$).
- f es el factor de fricción.
- g es la gravedad (m/s^2).
- θ es el ángulo de la pendiente ($^\circ$).

5.3. Si $H_{dam}/y_c < H_e/y_c$, se presentará un flujo rasante no uniforme, es decir, el flujo no alcanza el punto de atrapamiento de aire (Punto de inyección). Para estimar las condiciones hidráulicas del flujo se deberá seguir el siguiente procedimiento:

5.3.1. Determine la energía residual al pie del canal, mediante:

$$\text{Para } 5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad 0.1 \leq \frac{h}{y_c} \leq \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad 5.0 \leq P/y_c \leq H_e/y_c$$

$$\frac{E_{res}}{y_c} = 1.5 + \left(\left(\frac{E_{res}}{y_c} \right) - 15 \right) \left(1 - \left(1 - \frac{P}{H_e} \right)^m \right) \quad (16)$$

$$m = -\frac{\theta}{25} + 4 \quad (17)$$

- Para flujos tipo A

$$\frac{E_{res}}{y_c} = \frac{d}{y_c} \cos\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{y_c}{d} \right)^2 \quad (18)$$

- Para flujos tipo B

$$\frac{E_{res}}{y_c} = \frac{d}{y_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{y_c}{d} \right)^2 \quad (19)$$

6. Calcule la concentración media del aire.

$$C = 0.76(\sin\theta)^{0.82} \quad (20)$$

7. Calcule la profundidad y_{90} .

$$y_{90} = \frac{d}{1 - C} \quad (21)$$

8. Determinar la altura de los muros laterales.

$$H_{muro} = 1.4 \cdot y_{90} \quad (22)$$

Para un flujo rasante la concentración de aire y las velocidades del flujo son importantes, principalmente al pie de la estructura. Así mismo, es necesario comentar que para un flujo rasante, la profundidad del agua o tirante que se forma sobre la rápida, se debe calcular debido a que se pretende evitar un desbordamiento que pueda dañar taludes u obras accesorias. El ancho del vertedor también debe de contrastarse con lo posible topográficamente factible, y en su debido caso puede ser incluso posible la construcción de dos vertedores para el mejor funcionamiento de la obra.

Cabe considerar que dentro de esta metodología, hay condiciones que por diferentes circunstancias se pueden ignorar y revisar posteriormente. Y de no considerarse las restricciones de P/y_c , entonces se requiere revisar el diseño con un modelo hidráulico a escala.

Capítulo III

Fundamentos sobre computación evolutiva

3.1 Análisis de Algoritmos

Lo conforman el análisis *a priori* y el análisis *a posteriori*. El primero permite obtener una función que acota el tiempo de cálculo del algoritmo, y en el segundo se recolectan las estadísticas acerca del consumo de tiempo y espacio del algoritmo (Coello, 2004).

Una de las notaciones más usadas para expresar la complejidad de un algoritmo es la secuencia denominada “O” (Big O, en inglés) (Coello, 2004). En esta notación algunos tipos comunes de algoritmos son.

$$O(1) < O(\log n) < O(n) < O(n \log n) < O(n^2) < O(n^3) < O(2^n)$$

Los problemas cuya complejidad éste acotada por un polinomio son los denominados problemas P. Se dice que un problema pertenece a esta clase si puede ser resuelto en tiempo polinomial en una computadora determinística. Por determinístico se entiende que sin importar lo que haga el algoritmo, sólo hay una cosa que puede hacer a continuación (el paso siguiente se determina por los pasos anteriores). Un problema pertenece a la clase NP si puede ser resuelto en tiempo polinomial pero usando una computadora no determinística. Existen otra clase de problemas, denominados NP Completos, un problema pertenece a esta clase si todos los algoritmos requeridos para resolverlo requieren de tiempo exponencial en el peor caso; por lo que son problemas excepcionalmente difíciles de resolver (Coello, 2004).

Al comparar las clases P contra la NP, se debe recalcar que:

- La clase P contiene problemas que pueden resolverse rápidamente (Coello, 2004).
- La clase NP contiene problemas cuya solución se puede verificar rápidamente (Coello, 2004).
- ¿Es $P=NP$?, en 1971 se planteó esta pregunta y hasta el día de hoy es una duda que le concierne a los teóricos (Coello, 2004).
- Se cree que P no es igual a NP (Coello, 2004).

De manera sencilla, todo lo anterior implica que para algunos problemas, con la información y tecnología disponible, es más eficiente comprobar una solución que calcularla.

Una computadora no determinística al ser confrontada con varias opciones, tiene el poder de adivinar la correcta; en caso de que exista. Una computadora no determinística no hace nunca elecciones incorrectas que le hagan regresar a un estado previo. Obviamente una computadora no determinística no existe en el mundo real, y por lo tanto, el no determinismo es una herramienta imaginaria que hace que los problemas difíciles parezcan triviales. Existen formas de convertir algoritmos no determinísticos a determinísticos, a un costo computacional que usualmente es muy elevado (Coello, 2004).

3.2 Técnicas Clásicas de Optimización

Existen diversas técnicas clásicas para resolver problemas con ciertas características específicas, por lo que es importante saber por lo menos la existencia de estas técnicas, pues cuando el problema por resolver se adecua a ellas, no tiene sentido usar heurísticas (Coello, 2004).

Uno de los problemas de las técnicas clásicas de optimización es que requieren información que no siempre está disponible. Por ejemplo el método

de Newton requiere la primera y segunda derivada de la función objetivo, por lo que si esta no es diferenciable o ni siquiera está disponible en forma explícita, este método no puede aplicarse (Coello, 2004).

Algunos métodos de optimización clásica son:

- Método Fletcher-Reeves.
- Método de Newton.
- Método de gradiente conjugado.
- Método Simplex.
- Método de Cauchy.

3.3 Técnicas Heurísticas y Metaheurísticas

Existen problemas que no pueden resolverse usando un algoritmo que requiera tiempo polinomial (clase P) y en muchas aplicaciones prácticas, no se puede decir si existe una solución eficiente. De igual manera, hay muchos problemas para los cuales el mejor algoritmo que se conoce requiere tiempo exponencial. Cuando existen espacios de búsqueda tan grandes, y que además los algoritmos más eficientes requieren de tiempo exponencial, resulta obvio que las técnicas clásicas de optimización y búsqueda son insuficientes; es entonces cuando se recurre a las heurísticas (Coello, 2004).

La palabra heurística significa descubrir y se deriva del griego *heuriskein*. Fue un área predominante en el desarrollo de la inteligencia artificial (Coello, 2004).

Puede entenderse por heurística a una técnica que busca soluciones casi óptimas a un costo computacional razonable, sin garantizar que esta solución sea la más factible u óptima, o su cercanía a estos valores ideales (Reeves, 1993).

Más allá de las técnicas heurísticas existen otras denominadas metaheurísticas, con el propósito de mejorar los procedimientos heurísticos, implican la combinación y acoplamiento de diversas técnicas.

Metaheurísticas es un término usualmente usado para describir un campo mayor, el de la optimización estocástica. Son la clase general de algoritmos y técnicas que implican cierto grado de azar para encontrar un óptimo (o lo más cercano al mejor global) de problemas complicados. Las metaheurísticas en concreto son los algoritmos más generales y son aplicados a una gran variedad de problemas (Luke, 2013).

Las metaheurísticas son aplicadas al tipo de problemas donde se tiene muy poca información al alcance, no se conocen completamente las características de la solución y donde una búsqueda al azar forzada está fuera de cuestión debido a que el espacio es demasiado extenso. Pero de obtener una solución candidata se puede probar y determinar su eficacia (Luke, 2013).

La cantidad de métodos del tipo metaheurísticos son bastantes, algunos de ellos son:

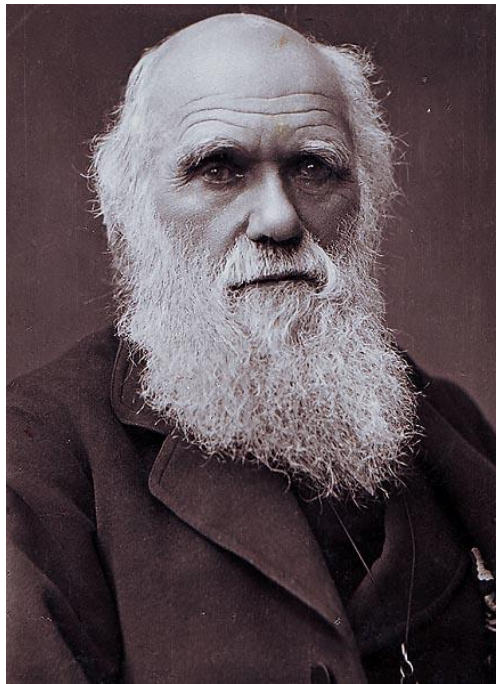
- Búsqueda Tabú.
- Búsqueda iterativa local.
- Búsqueda scatter.
- Recocido simulado.
- Algoritmos genéticos.
- Método de muestreo directo de Monte-Carlo.
- Particle Swarm Optimization.

Los que le conciernen a este trabajo son los métodos basados en poblaciones que difieren de otros métodos en que mantienen una muestra de posibles soluciones en vez de una sola. Cada una de las soluciones está

involucrada en la valoración de ajuste y calidad, dichas soluciones afectan la manera en que el resto de soluciones opera en la función de calidad, esto ocurre debido a que buenas soluciones ocasionan el rechazo de las malas soluciones, creando nuevos candidatos o ajustando los existentes en la dirección de las mejores soluciones (Luke, 2013).

3.4 Historia y Antecedente de la Teoría Evolutiva

Las ideas evolucionistas que se hicieron populares debido a Charles Darwin en 1858 no se originaron con él, estando presentes en la mente de una serie de científicos y pensadores en general que no se sentían satisfechos con la entonces popular idea de que Dios había creado de forma separada a todas las especies del planeta (Coello, 2004).



Fotografía 17. Charles Darwin.

George Louis Leclerc (Conde de Buffon) fue probablemente el primero, especulando 100 años antes que Darwin que las especies se originaron entre sí en su *Historie Naturelle*, incluso trata el tema de un posible ancestro común entre el hombre y el simio; creyendo en un cambio orgánico ocasionado por el ambiente, sin describir un mecanismo coherente responsable de efectuarlos (Coello, 2004).



Fotografía 18. George Louis Leclerc (Conde de Buffon).

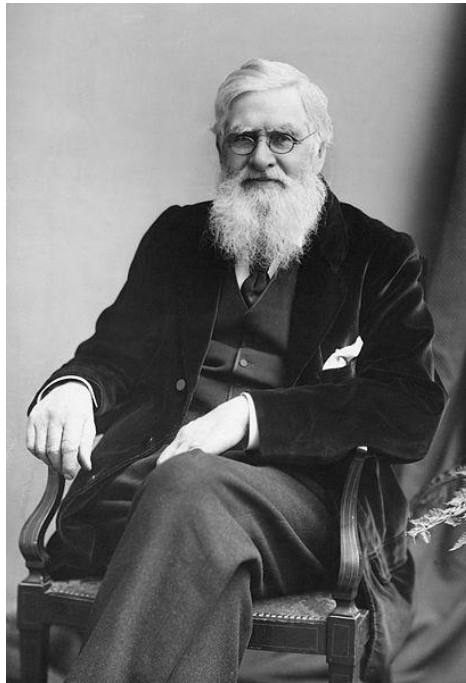
En 1801, el zoólogo francés Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet (caballero de Lamarck) comenzó a publicar detalles de su propia teoría evolutiva, enfatizando la importancia de la naturaleza en los cambios de las especies. A diferencia de Leclerc, explicó un mecanismo responsable de los cambios en las especies, al cual hoy en día se le conoce como Lamarckismo, que hoy en día se usa para referirse a la teoría de que las características

adquiridas por un individuo son hereditarias. Lamarck creía que los organismos eran alterados por un cambio en el ambiente que cambiaba las necesidades y por consiguiente su comportamiento, ocasionando el uso o desuso de ciertos órganos. El mecanismo propuesto por Lamarck difiere del de Darwin, aunque cabe notar que ambas teorías conducen a los mismos resultados. Con el desarrollo de la genética, las ideas de Lamarck fueron completamente desacreditadas y hoy en día se consideran obsoletas (Coello, 2004).

August Weismann formuló en el siglo XIX la teoría de la germoplasma, según la cual el cuerpo se divide en células germinales que pueden transmitir información hereditaria (germoplasma) y en células somáticas (somatoplasma), que no pueden hacerlo. Sus ideas se contraponían con el Lamarckismo, por lo que condujo una serie de experimentos en los cuales cortó la cola de un grupo de ratas durante veintidós generaciones (1,592 ratones), logrando observar que esto no afectaba la longitud de la cola en las nuevas generaciones. Demostrando los errores en la herencia de características de la teoría Lamarckista y redescubriendo el trabajo de Mendel sobre las leyes de herencia. Para Weismann, la selección natural era el único mecanismo que podía cambiar el germoplasma (genotipo) y que tanto el germoplasma como el ambiente podían influenciar el somatoplasma (fenotipo) (Coello, 2004).

Alfred Russell Wallace fue un autodidacta que se interesó en el origen de las especies por el año 1850, siendo capaz de intuir la teoría de la selección natural sin saber que Charles Darwin se le había adelantado. El 1 de julio de 1858 en conjunto presentaron un trabajo a la *Linnean Society* de Londres, que fue publicado posteriormente en el *Journal of the Linnean Society*. Ambos estuvieron influenciados fuertemente por el trabajo del economista Thomas Robert Malthus y del geólogo Charles Lyell. Darwin prosiguió a enfocarse en escribir un libro sobre la evolución, titulado *El origen de las*

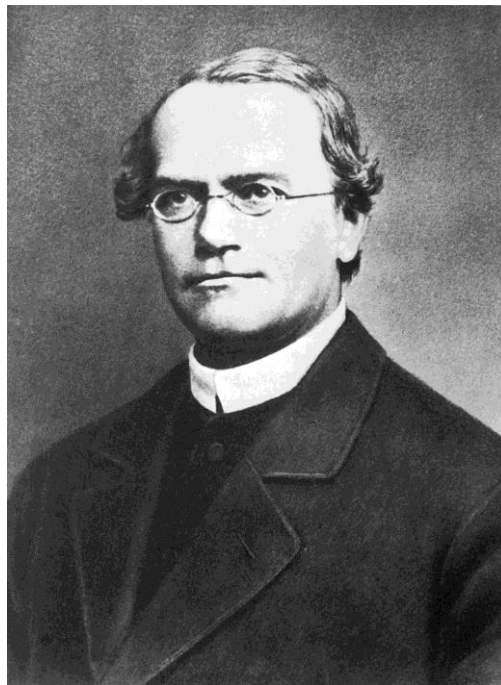
especies, que publicaría en 1859 con gran éxito. Llegando a las conclusiones de que una especie que no sufre cambios se volvería incompatible con un ambiente en constante cambio, las similitudes entre padres e hijos en la naturaleza debido a características hereditarias y cambios generacionales que tenían por objetivo crear individuos aptos para sobrevivir (Coello, 2004).



Fotografía 19. Alfred Russel Wallace, 1896.

El monje austriaco Johann Gregor Mendel estudió las características de los guisantes a lo largo de una serie de experimentos durante gran parte de su vida (Coello, 2004). A lo largo del análisis de estas características descubrió tres principales leyes que gobernaban el paso de una característica de un miembro de una especie a otro:

- 1) Ley de la segregación. Establecía que los miembros de cada par de alelos de un gen se separan cuando se producen los gametos durante la meiosis (Coello, 2004).
- 2) Ley de la independencia. Establecía que los pares de alelos se independizan o separan durante la formación de gametos (Coello, 2004).
- 3) Ley de la uniformidad. Establecía que cada característica heredada se determina mediante dos factores provenientes de ambos padres, que se decide en relación a si un gen es dominante o recesivo (Coello, 2004).



Fotografía 20. Johann Gregor Mendel.

Aunque Mendel descubrió las leyes de la herencia, no consiguió entender el mecanismo detrás de ella o los genes, así como la forma en que se transmitían de generación en generación.

Con base en todo lo anterior es que se formó el Neodarwinismo, también conocido como teoría sintética, síntesis evolutiva moderna, teoría moderna o síntesis evolutiva; propuesta por Charles Darwin en principal combinación con el seleccionismo de Weismann y la genética de Gregor Mendel (Coello, 2004). A pesar de su falta de explicación de algunos procesos biológicos, hoy en día goza de un abrumador consenso por parte de la comunidad científica, y es considerada como la piedra angular de la biología moderna.

3.5 Síntesis Evolutiva Moderna y sus fundamentos

El material genético fundamental de todos los organismos vivos es el Acido Desoxirribonucleico (ADN). Tiene una estructura helicoidal, doblemente trenzada por filamentos de ácido nucleico lineal y sin ramificaciones, formadas de moléculas alternadas de desoxirribosa (azúcar) y fosfato. Puede contener desde una docena de genes (virus) hasta decenas de miles (ser humano) (Coello, 2004).

El alfabeto de información genética que determina la estructura de cualquier organismo está compuesto por cuatro bases de nucleótido: Adenina, Timina, Citosina y Guanina (Coello, 2004).

Un gen es una unidad de herencia, una sección de ADN que codifica una función química definida, usualmente asociada a la producción de una proteína. A la colección de genes que posee un organismo se le llama genoma. Se dice que un gen es apistático o de inhibición cuando su presencia suprime el efecto de un gen que se encuentra en otra posición (Coello, 2004).

A las cadenas de ADN que se encuentran en el núcleo de las células se les denomina cromosomas, los cromosomas son responsables de la transmisión

genética. Una célula haploide es aquella que contiene un solo cromosoma o conjunto de ellos, cada uno de los cuales consiste de una sola secuencia de genes. Y una célula diploide es una célula que contiene dos copias homólogas de cada cromosoma, es decir que contiene los mismos genes en la misma secuencia. El genotipo da origen, tras el desarrollo fetal y posterior, al fenotipo del organismo (Coello, 2004).

Cada gen es capaz de ocupar una región en particular de un cromosoma, pudiendo existir formas alternativas de gen. A estas formas alternativas se les llama alelos. Se denomina gametos a las células encargadas de transportar la información genética de los padres con el propósito de efectuar reproducción sexual, como lo son el esperma y los óvulos en el caso de animales (Coello, 2004).

Un individuo es un solo miembro de una población. Población es un grupo de individuos que son capaces de interactuar entre sí. Ambiente es todo aquello que rodea a un organismo. Por especie se entiende a una colección de criaturas vivientes que tiene características similares, estas ocupan el mismo nicho ecológico y son formadas en un proceso conocido como especiación; principalmente debido al aislamiento geográfico. A los rasgos observables específicos de un individuo se le denomina fenotipo y genotipo a la composición genética de un organismo (Coello, 2004).

Pleitropía es el efecto en el cual un solo gen puede afectar simultáneamente a varios rasgos fenotípicos. Poligenia, por otra, parte es el efecto donde una sola característica fenotípica de un individuo puede ser determinada mediante la interacción simultánea de varios genes (Coello, 2004).

Se denomina reproducción a la creación de un nuevo individuo a partir de dos progenitores (sexual) o uno solo (asexual) (Coello, 2004). Durante la reproducción sexual ocurre la recombinación o cruza, que puede ser:

- Caso Haploide. Se intercambian los genes entre los cromosomas de los padres (Coello, 2004).
- Caso Diploide. En cada padre se intercambian los genes entre cada par de cromosomas para formar un gameto, posteriormente los gametos de ambos padres se aparean y forman un solo conjunto de cromosomas diploides (Coello, 2004).

De cambiar los nucleótidos individuales de padre a hijo, usualmente por error de copiado ocurre un fenómeno denominado mutación. La aptitud de un individuo es la probabilidad de que este viva para reproducirse (viabilidad) o en función del número de descendientes que sea capaz de procrear (fertilidad). Se le llama deriva genética a los cambios en la frecuencia de genes/alelos en una población con el paso de generaciones debido al azar en vez de la selección, ocurre más rápidamente en poblaciones pequeñas, puede reducir la variabilidad de dicha población debido a la extinción de alelos (Coello, 2004).

La selección natural es el proceso mediante el cual algunos individuos en una población son seleccionados para reproducirse, típicamente en base a su aptitud. Esta selección puede ser dura o blanda, dependiendo de qué tipo de individuos sean capaces de generar progenie, siendo los de mejores aptitudes en la primera y aquellos con aptitudes relativamente bajas en la segunda (Coello, 2004).

Por evolución se puede entender al concepto de que todos los organismos en el planeta Tierra han cambiado a partir de una forma de vida ancestral común por medio de transformaciones genómicas y morfológicas (Niklas y Kutschera, 2004).

Las principales conclusiones que alcanzó la teoría moderna fueron dos:

1. Que la gradual evolución puede ser explicada en términos de pequeños cambios genéticos (mutaciones) y recombinación, debido a la selección natural (Niklas y Kutschera, 2004).
2. El fenómeno evolutivo observado, particularmente procesos macroevolutivos y de especiación, pueden ser explicados de una manera que sea consistente con los mecanismos genéticos conocidos (Niklas y Kutschera, 2004).

La principal unidad evolutiva son las poblaciones de organismo y no necesariamente los tipos de ellos. Donde la variabilidad fenotípica y genotípica en poblaciones de plantas y animales son concebidas por la recombinación genética, reorganización de segmentos de cromosoma, resultando de la reproducción sexual y mutaciones aleatorias a lo largo de la secuencia padre-descendencia (Niklas y Kutschera, 2004).

La cantidad de variación genética de una población de organismos que se reproducen de manera sexual es enorme, por poner un ejemplo:

Considerando a un único padre con N números de genes, cada uno con únicamente dos alelos. Este individuo puede producir 2^N , genéticamente diferente espermas u óvulos. Dado que la reproducción sexual involucra necesariamente al menos dos padres, cada juego puede producir una descendencia con uno de 4^N diferentes genotipos. Por consiguiente, si cada genotipo de un padre tiene meramente 150 genes con dos alelos cada uno (una grossa subestimación del genoma humano), cada padre puede dar nacimiento a 10^{45} genéticamente diferentes espermas u óvulos, y un único juego de padres puede producir más de 10^{90} ejemplares de descendencia genéticamente diferentes (una cifra que se acerca a la estimación del número total de partículas en el universo observable) (Niklas y Kutschera, 2004).

Una de las fuerzas que dan forma al curso de la evolución fenotípica, es la selección natural. Al cambiar el ambiente, la selección direccional es de

especial importancia, debido a que ocasiona un cambio en la media poblacional en dirección a un nuevo fenotipo que está mejor adaptado a las condiciones alteradas del entorno. Adicionalmente en poblaciones pequeñas, la deriva genética al azar (pérdida de genes de la reserva genética) puede ser de importancia (Niklas y Kutschera, 2004).

Un paso sumamente relevante del proceso evolutivo es el de la especiación, debido a que durante éste las diferentes formas de organismos se vuelven incapaces de reproducirse entre ellos debido a sus diferencias genéticas. Se cree que el aislamiento geográfico de poblaciones fundadoras es el responsable del origen de nuevas especies en islas y otros hábitats aislados (especiación alopátrica). Aunque la especiación sin este aislamiento (especiación simpátrica) también ha sido documentada de manera extensiva en insectos, plantas, peces y aves. Las transiciones evolutivas en estas poblaciones son usualmente graduales; como puede ser el que nuevas especies evolucionen de variedades ya existentes por medio de procesos lentos y manteniendo en cada etapa sus adaptaciones específicas. Existen excepciones a esta regla general y también debe considerarse la inmigración de individuos de poblaciones colindantes (Niklas y Kutschera, 2004).

Aún más allá de los pequeños cambios mencionados anteriormente que dan como origen a la microevolución, existe la macroevolución, que consiste de desarrollos filogenéticos sobre el nivel de las especies. Igualmente consiste de procesos graduales que no son más que una extrapolación de la microevolución (Niklas y Kutschera, 2004).

3.6 Computación Evolutiva

El significativo avance algorítmico ha permitido el diseño de modelos algorítmicos con el propósito de resolver problemas cada vez más complejos.

Enormes logros han sido conseguidos a través del modelaje de la inteligencia biológica y natural, dando como resultado sistemas inteligentes. Algoritmos inteligentes que en conjunto con su lógica, razonamiento deductivo y basada de caso en caso y sistemas de aprendizaje simbólico; forman parte del campo de la inteligencia artificial o Artificial Intelligence (AI) (Engelbrecht, 2007).

Definir inteligencia es un tema altamente debatido por la comunidad científica, El diccionario la contempla como la habilidad de comprender, entender y tomar provecho de la experiencia. O como la capacidad de pensar y razonar, especialmente a un alto nivel. Una definición reciente de inteligencia artificial proviene de IEEE Neural Networks Council (Consejo de Redes Neuronales) de 1996 que la define como el estudio de cómo lograr que las computadoras realicen actividades en las cuales los humanos son mejores (Engelbrecht, 2007).

Un tema aún más debatido que la definición de inteligencia, es la pregunta ¿Pueden las computadoras ser inteligentes? A mediados de los años noventa, Alan Turing creía fuertemente que no había nada que un cerebro humano pudiese hacer que una computadora bien diseñada no pudiera. Más de cincuenta años después sus creencias siguen siendo visionarias. En 1950 Turing publicó su examen de inteligencia computacional, conocido como el Test de Turing; consistía de una persona haciendo preguntas mediante un teclado a una persona y a una computadora, si el interrogador era incapaz de diferenciar las respuestas de la computadora de las del humano, la primera podría ser clasificada como inteligente (Engelbrecht, 2007).



Fotografía 21. Alan Turing.

La idea de implementar ideas de principios darwinianos a problemas de soluciones automatizadas se origina en los años cincuenta del siglo XX, incluso antes de los avances tecnológicos que dieron origen a las computadoras modernas, durante los años sesenta tres tipos diferentes de implementaciones de esta idea fueron desarrolladas en tres sitios diferentes. En los Estados Unidos de América Fogel introdujo programación evolutiva, mientras que Holland llamó a su método algoritmo genético y en Alemania Rechenberg y Schwefel inventaron las estrategias evolutivas. Por prácticamente quince años estas áreas maduraron de manera separada y fue hasta los años noventa cuando fueron clasificadas como diferentes representaciones de una tecnología, llamada computación evolutiva (Eiben y Schoenauer, 2002).

Computación Evolutiva o Evolutionary Computation (EC) tiene como objetivo imitar procesos evolutivos naturales, donde el principal concepto es la

supervivencia del más apto: el débil debe morir. En la evolución natural, la supervivencia es adquirida a través de la reproducción. Con el propósito de crear descendencia, producida de dos padres (a veces más de dos), que contiene material genético de ambos (o de todos) los padres, idealmente las mejores características de cada uno. Aquellos individuos que heredan malas características son débiles y pierden la batalla por la supervivencia. Esto es ilustrado en algunas especies de ave, donde un polluelo logra conseguir más alimento, volviéndose más fuerte, y termina por empujar a sus hermanos del nido hacia su muerte (Engelbrecht, 2007).

Un algoritmo evolutivo usa una población de individuos, donde un individuo es referido como cromosoma. Un cromosoma define las características de individuos en la población. Cada característica es llamada gen. El valor de un gen es referido como alelo. Por cada generación, individuos compiten por procrear. Aquellos individuos con la mejor capacidad de supervivencia tienen la mayor oportunidad de reproducirse. Descendencia es generada mediante la combinación de partes de los padres, por un proceso denominado cruce. Cada individuo en la población también puede experimentar mutaciones que alteren alguno de los alelos del cromosoma. La fuerza de supervivencia de un individuo es medida usando una función de aptitud, que refleja los objetivos y limitaciones del problema a resolver. Después de cada generación, algunos individuos serán sacrificados y otros sobrevivirán para la siguiente generación (conocido como elitismo). Adicionalmente, características de comportamiento (encapsuladas en fenotipos) pueden ser usadas para influenciar el proceso evolutivo (Engelbrecht, 2007).

A lo largo de los años se han desarrollado diferentes clases de algoritmos evolutivos, también llamados paradigmas, algunos de ellos son:

- a) Algoritmos genéticos. Los cuales modelan evolución genética (Engelbrecht, 2007), con énfasis en la cruce sexual y una selección probabilística (Coello, 2004).

- b) Programación genética. La cual se basa en algoritmos genéticos, pero los individuos son programas (Engelbrecht, 2007).
- c) Programación evolutiva. Se deriva de la simulación de comportamientos adaptativos en la evolución (Engelbrecht, 2007), normalmente emplea selección estocástica (Coello, 2004).
- d) Estrategias evolutivas. Dirigido hacia la modelación de parámetros de estrategia que controlan la variación en la evolución (Engelbrecht, 2007), usa selección determinística (Coello, 2004).
- e) Optimización por enjambre de partículas. Estudia el comportamiento social de individuos u organismos en enjambres mediante un enfoque estocástico (Engelbrecht, 2007).
- f) Evolución diferencial. Es similar a algoritmos genéticos, difiriendo en el mecanismo de reproducción empleado (Engelbrecht, 2007).
- g) Evolución cultural. Modela la evolución de la cultura de una población y su capacidad de influenciar la evolución genética y fenotípica de individuos (Engelbrecht, 2007).
- h) Coevolución. Donde individuos menos aptos evolucionan a través de la cooperación o la competencia entre ellos, adquiriendo las características necesarias para sobrevivir (Engelbrecht, 2007).

La computación evolutiva ha sido empleada exitosamente en aplicaciones del mundo real, por ejemplo en los campos de: minería de datos, sistemas multidimensionales, redes neuronales, control de calidad, optimización combinatoria, bioinformática, selección de modelos matemáticos óptimos para describir sistemas biológicos, análisis de mezcla de mercadotecnia, óptica, diseño de sistemas de distribución de agua, análisis lingüístico, programación, magnetismo, problemas de ruteo y redes.

3.7 Conceptos de Computación Evolutiva

Cualquier solución potencial a un problema puede ser presentada dando valores a una serie de parámetros. El conjunto de dichos parámetros o genes se codifica en una cadena de valores denominada cromosoma (Gestal, Rivero, Rabuñal, Dorado y Pazos, 2010).

Por lo tanto a la subsección de un cromosoma que usualmente codifica el valor de un solo parámetro se le llama gen (Coello, 2004), Cada uno de los bits pertenecientes a un gen suelen ser llamados alelo. Genotipo es el nombre que recibe el conjunto de los parámetros representado por un cromosoma particular (Gestal et al., 2010).

El genotipo contiene la información necesaria para la construcción del organismo, es decir, la solución real del problema, conocida como fenotipo (Gestal et al., 2010). Siendo por ello la decodificación del cromosoma (Coello, 2004).

Individuo es un solo miembro de la población de soluciones potenciales a un problema, y cada uno contiene un genoma que representa una solución posible al problema a resolver. Se llama generación a una iteración de la medida de aptitud y la creación de una nueva población por medio de operadores de reproducción (Coello, 2004).

Se llama operador de reproducción a aquel mecanismo que influencia la forma en que pasa la información genética de padres a hijos (Coello, 2004). Pertenecen a tres categorías principalmente:

- Cruza. Forma un nuevo cromosoma combinando partes de cada uno de sus cromosomas padres (Coello, 2004).

- Mutación. Forma un nuevo cromosoma a través de alteraciones pequeñas de los valores de los genes de un solo cromosoma padre (Coello, 2004).
- Reordenamiento. Cambia el orden de los genes de un cromosoma, con la esperanza de juntar los genes que se encuentren relacionados (Coello, 2004).

Se denomina aptitud al valor que se asigna a cada individuo, que indica que tan bueno es este con respecto a los demás para la solución de cierto problema y paisaje de aptitud a la hipersuperficie obtenida al aplicar la función de aptitud (Coello, 2004).

Se denomina exploración al proceso de visitar completamente nuevas regiones del espacio de búsqueda, para ver si puede encontrarse algo prometedor. La exploración involucra grandes saltos hacia lo desconocido, mientras que la explotación normalmente involucra movimientos finos. La primera es buena para evitar quedar atrapado en óptimos locales y la segunda es buena para encontrarlos (Coello, 2004).

3.8 Inteligencia de enjambre: comportamiento de hormigas

Típicamente, hormigas en el laboratorio son expuestas a un conjunto de puentes conectando dos o más áreas donde las hormigas exploran, comen, y realizan el resto de sus actividades. Conforme las hormigas deambulan, descubren y cruzan puentes. Mientras se mueven en lo que efectivamente es un recorrido unidimensional llegan a intersecciones donde escogen una nueva rama, continuando su rumbo. Ya que las hormigas liberan y siguen olores producidos por agentes químicos mientras caminan, el flujo de hormigas en los puentes cambia a lo largo del tiempo. Los tipos de conductas emergentes de las hormigas pueden ser entonces estudiadas de

una manera controlada por medio de la observación de su respuesta a varias situaciones. Además, numerosos modelos matemáticos y simulaciones por computadora han sido estudiadas, capturando algunos de los comportamientos observados en el laboratorio (Millionas, 1994).



Fotografía 22. Hormigas explorando el espacio dentro de un ambiente de laboratorio.

Los resultados experimentales indican el tipo de cálculo ambiental o emergente que las hormigas realizan. El término de cálculo ambiental se refiere al hecho de que las hormigas colectivamente realizan recolección y procesamiento de información en el ambiente local. Tanto el procesamiento como la recolección ocurren de manera simultánea, sin controles centralizados. A partir de estas observaciones es que se formaron el conjunto básico de tareas que cualquier modelo debe explorar (Millionas, 1994).

De este tipo de experimentos se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1) Cuando las hormigas son expuestas a dos caminos de longitudes distintas, las hormigas seguirán el camino más corto (Millionas, 1994).
- 2) Si un camino más corto es ofrecido después de que las hormigas han escogido, estas son incapaces de cambiar al nuevo camino (Millionas, 1994).
- 3) Las hormigas romperán la simetría y escogerán un camino, incluso cuando ambos caminos sean iguales (Millionas, 1994).
- 4) Si a las hormigas se les ofrecen dos fuentes de alimento desiguales, estas escogerán la fuente más rica (Millionas, 1994).
- 5) Si una mejor fuente de alimento es ofrecida después de que las hormigas han escogido, algunas especies pueden cambiar a esta nueva fuente y otras son incapaces (Millionas, 1994).
- 6) Si dos fuentes de alimento iguales son ofrecidas, las hormigas aprovechan los recursos de manera desigual, rompiendo simetría (Millionas, 1994).

3.8.1 Principios básicos de la inteligencia de enjambre

Un gran número de científicos han creado simulaciones computacionales de varias interpretaciones sobre el movimiento de organismos en un grupo de aves (parvada), de peces (cardumen) o de ciertos insectos (enjambre). Se volvió obvio durante el desarrollo del concepto de enjambre de partículas que el comportamiento de la población de agentes era más similar a un enjambre que a una bandada. El término *enjambre* tiene base en la propia literatura, en particular se usa en relación a un documento publicado por M. Millonas (Kennedy y Eberhart, 1995). Quien enlistó amplias categorías conductuales que pueden ser clasificadas como inteligencia colectiva o de enjambre.

Pensados como principios evolutivos de selección, sin ser de naturaleza definitiva (Millionas, 1994). Estos principios son cinco:

- a) Principio de proximidad. El grupo debe ser capaz de realizar cálculos elementales de espacio y tiempo. Por cálculos se entiende, a la respuesta conductual directa a un estímulo ambiental que en algún sentido maximiza la utilidad del grupo en cierta actividad. Debido a que espacio y tiempo son equivalentes a la cantidad de energía empleada, el grupo requiere la habilidad de calcular la utilidad de una respuesta al entorno en estos términos. Algunas actividades típicas pueden ser la búsqueda y retiro de alimentos, construcción de nidos, defensa y movimiento del grupo, funciones sociales, etc. (Millionas, 1994).
- b) Principio de calidad. El grupo debe ser capaz de responder no solo a consideraciones de tiempo y espacio, sino también a factores de calidad, como puede ser la calidad de un alimento y que tan seguro es su acceso (Millionas, 1994).
- c) Principio de respuesta variada. El grupo no debe asignar todos sus recursos a lo largo de una línea excesivamente estrecha. Debe procurar la distribución de recursos de varios modos, como seguro contra los súbitos cambios sobre ellos debido a las fluctuaciones del ambiente. Está claro que una respuesta completamente ordenada al ambiente, incluso si es posible, puede no ser la más deseada (Millionas, 1994).
- d) Principio de estabilidad. El grupo no debe cambiar su comportamiento de una manera a otra por cada fluctuación del ambiente, debido a que estos cambios consumen energía, y puede que no produzcan un retorno de inversión (Millionas, 1994).
- e) Principio de adaptabilidad. Cuando las recompensas por el cambio de comportamiento prometen ser dignas de la inversión de energía, el

grupo deberá ser capaz de realizar dicho cambio. La mejor respuesta es probablemente aquella que comprende un balance entre el completo orden y el caos total, por lo que el nivel de aleatoriedad en el grupo es un factor importante, suficiente sonido permitirá una respuesta diversa, pero demasiado y la cooperación se perderá (Millionas, 1994).

Estos principios probablemente englobaran el comportamiento de la mayoría de sistemas con comportamiento capaz de adaptación.



Fotografía 23. Todos los miembros de la escuela de peces exploran su entorno en búsqueda de alimento y depredadores.

El paradigma y concepto de PSO responde a los cinco principios presentados anteriormente:

- 1) Es fundamental para el paradigma que los cálculos sean llevados a través de una serie de pasos en el espacio n -dimensional (Kennedy y Eberhart, 1995).
- 2) La población responde a la calidad de los factores p_{best} y g_{best} (Kennedy y Eberhart, 1995).

- 3) La asignación de respuestas entre *pbest* y *gbest* aseguran una diversidad de respuestas (Kennedy y Eberhart, 1995).
- 4) La población cambia su estado (modo de comportamiento) solo cuando *gbest* cambia, siguiendo el principio de estabilidad (Kennedy y Eberhart, 1995).
- 5) La población es adaptativa porque cambia cuando *gbest* cambia (Kennedy y Eberhart, 1995).

3.9 Particle Swarm Optimization (PSO) o Enjambre de Partículas (OEP)

El concepto de Optimización por Enjambre de Partículas (OEP), mejor conocido como Particle Swarm Optimization (PSO) por su nombre en inglés, tiene raíces principalmente en dos metodologías. Primeramente y de mayor obvedad tiene lazos con Computación Evolutiva, y en segundo lugar, de menor importancia, en lo que refiere al tema de este escrito con Artificial Life (A-Life) o Vida Artificial (Kennedy y Eberhart, 1995).

El PSO fue presentado por el doctor Kennedy, J. y Eberhart, R. C. en 1995 y fue desarrollado con el propósito de emular el comportamiento de sociedades animales donde no existe un líder concreto dentro del grupo o enjambre, tales como parvadas (aves) y escuelas (peces). Típicamente, un grupo de animales que no cuenta con un líder encuentra su alimento de manera aleatoria, al seguir a uno de los miembros que se encuentra en la posición más cercana a una fuente de alimento (solución potencial). Los grupos logran mejorar su condición simultáneamente mediante la combinación entre miembros que ya se encuentran en una situación favorable (Yarpiz, 2018). El individuo que se encuentra en la mejor condición informa al resto y el resto se moviliza de manera simultánea a su posición.

Esta secuencia se repite hasta que se encuentra una fuente de alimento o si se obtienen las mejores condiciones (Palupi, Shamsuddin e Yuhaniz, 2011).

Es una técnica metaheurística, similar a un algoritmo genético en el sentido de que el sistema parte con una población de soluciones aleatorias. Aunque difieren en que las potenciales soluciones cuentan con una velocidad asignada aleatoriamente, y las potenciales soluciones, nombradas partículas, son lanzadas a través del hiperespacio. De igual manera no sufre de algunas de las dificultades de los algoritmos genéticos; interacción entre el grupo mejora el progreso hacia la solución en vez de empeorarlo (Yarpiz, 2018). Adicionalmente, un sistema de enjambre de partículas tiene memoria, mientras que uno de algoritmo genético no la posee. Un cambio en poblaciones genéticas resulta en la destrucción de previo conocimiento del problema, a excepción de situaciones donde el elitismo es empleado, lo que usualmente causa que solo uno o un pequeño número de individuos retengan su identidad. En la optimización por enjambre de partículas, individuos que sobrepasan la óptima son arrastrados para regresar a ella; el conocimiento de las mejores soluciones es conservado por todas las partículas (Kennedy y Eberhart, 1995).

El termino partícula no es del todo exacto. Puede ser argumentado que los miembros de la población no tienen masa ni volumen, por lo que podrían llamarse puntos; pero las propiedades de velocidad y aceleración son más apropiadas en partículas, incluso si cada una es definida por una masa y volumen arbitrariamente pequeño (Kennedy y Eberhart, 1995).

Cada partícula realiza un seguimiento de sus coordenadas en el hiperespacio, que son asociadas con la mejor solución que ha obtenido. Este valor es llamado *pbest*. De igual manera, otro “mejor” valor es seguido, la versión global del optimizador de enjambre de partículas, mantiene el mejor valor general obtenido por la totalidad de partículas, así como su ubicación; este valor es llamado *gbest* (Kennedy y Eberhart, 1995).

El algoritmo básico de PSO es el siguiente:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

$$\begin{aligned} v_i(t) &= wv_i(t-1) + c_1r_1(localbest(t) - x_i(t-1)) \\ &+ c_2r_2(globalbest(t) - x_i(t-1)) \\ &= wv_{ij}(t) + c_1r_1(P_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2r_2(G_j(t) - x_{ij}(t)) \end{aligned}$$

Dónde:

- x_i denota la posición de la partícula i en el espacio de búsqueda en el tiempo t .
- t denota pasos discretos de tiempo.
- v_i representa la velocidad de la partícula.
- w es el coeficiente de inercia.
- c_1 y c_2 son coeficientes de aceleración.
- r_1 y r_2 son vectores aleatorios.
- $v_{ij}(t)$ es el término de inercia.
- $c_1r_1(P_{ij}(t) - x_{ij}(t))$ es el componente cognitivo.
- $c_2r_2(G_j(t) - x_{ij}(t))$ es el componente social.

Las partículas cambian su condición acorde a tres principios:

1. Mantener su inercia (Bai, 2010).
2. Cambiar la condición de acuerdo con su mejor posición o $pbest$ (Bai, 2010).
3. Cambiar de condición de acuerdo con la mejor posición del enjambre o $gbest$ (Bai, 2010).

Mediante iteraciones realizadas, la posición de cada partícula en el enjambre es afectada en parte por la mejor posición durante su movimiento (experiencia individual) y mejora la posición de la partícula en su cercanía (experiencia cercana) (Bai, 2010), cambiando la velocidad (aceleración) de cada partícula hacia su *pbest* y *gbest* (versión global). La aceleración es ponderada por un término aleatorio, con números al azar separados, siendo generados para la aceleración hacia *pbest* y *gbest*. La única variable que debe ser determinada por el usuario es la velocidad máxima a la cual las partículas serán limitadas (Kennedy y Eberhart, 1995).

Cada partícula puede ser identificada por su posición y velocidad actual, así como su *pbest* (Bai, 2010). En PSO, exploración es la habilidad del algoritmo de revisar diferentes regiones del espacio de búsqueda en orden a localizar un óptimo y explotación por otra parte, es la habilidad de concentrar la búsqueda sobre un área prometedora a orden de refinar una solución candidata. Con la exploración y la explotación, la partícula viaja por el hiperespacio (Palupi et al., 2011).

3.9.1 Ventajas

- Consta de un concepto muy simple, cuyos paradigmas pueden ser implementados en pocas líneas de código computacional que resulta en bajos costos computacionales en términos de memoria y velocidad (Kennedy y Eberhart, 1995).
- Ha probado ser efectivo al aplicarse en investigaciones científicas y de ingeniería (Bai, 2010).

- El PSO adopta un código de números reales, y es decidido directamente por la solución. El número de dimensiones es igual a la constante de la solución (Bai, 2010).
- PSO no tiene cálculos de superposición o mutación por lo que la búsqueda es llevada a cabo por la velocidad de la partícula, siendo la velocidad de la investigación significativamente rápida (Bai, 2010).

3.9.2 Desventajas

- El método sufre fácilmente de optimismo parcial, que ocasiona una regulación menos exacta de su velocidad y de su dirección (Bai, 2010).
- El PSO no funciona en problemas con sistemas no coordenados (Bai, 2010).
- El PSO no funciona en problemas de dispersión (Bai, 2010).

3.10 Variantes del PSO

Existen una multitud de variantes al algoritmo original de PSO que tienen por propósito el solucionar algunos de los problemas que se pueden presentar durante la ejecución del algoritmo en su versión más simple. Cada una de ellas con sus fortalezas y debilidades, que permiten que su uso con criterio beneficie a la incorporación del PSO como método de optimización.

3.10.1 Sujeción de Velocidad (Velocity Clamping)

Controla la exploración global de la partícula, si la velocidad (v) de la partícula (i) excede el límite de velocidad permitido, se establecerá un máximo valor de velocidad. Esto reduce el tamaño del paso de la velocidad, ya que cambios en la dirección de búsqueda pueden hacer que una partícula ejecute una mejor exploración pero también tiene efectos negativos y el valor óptimo no puede ser encontrado (Bai, 2010).

3.10.2 Peso de inercia (Inertia Weight)

Es un mecanismo para controlar las habilidades de exploración y explotación del enjambre y para eliminar la necesidad de una sujeción de velocidad. El peso de inercia (w), controla el momento de la partícula al darle peso a la contribución de la velocidad previa; básicamente controlando que tanta memoria de la anterior dirección de vuelo influencia la nueva velocidad. Un mayor peso de inercia al final de la búsqueda fomentará la habilidad de convergencia pero ésta dependerá fuertemente del propio valor propuesto (Bai, 2010).

3.10.3 Coeficiente de Constricción (Constriction Coefficient)

El enfoque de constricción fue diseñado como una manera natural y dinámica de asegurar la convergencia en un punto estable, sin la necesidad de una sujeción de velocidad. Beneficia al algoritmo de manera similar a la variación por peso de inercia, con la desventaja de que cuando el algoritmo converge, los valores fijos de los parámetros pueden ocasionar una innecesaria fluctuación en las partículas (Bai, 2010).

3.10.4 Actualizaciones Síncronas contras Asíncronas (Synchronous Versus Asynchronous Updates)

Las actualizaciones síncronas son hechas de manera separada de las actualizaciones de posición de la partícula, únicamente brindando una retroalimentación por actualización de iteración, con una lenta retroalimentación y mejor para *gbest* (global best). Mientras que las actualizaciones asíncronas son mejores para *lbest* (local best), las actualizaciones calculan las nuevas mejores posiciones después de cada actualización de posición de cada partícula y tiene la ventaja de que una inmediata retroalimentación es obtenida sobre la mejor región del espacio de búsqueda. Mejora la velocidad de la convergencia a cambio de requerir formulaciones más sofisticadas de elemento finito y generación de mallas densas (Bai, 2010).

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN DEL PSO EN EL DISEÑO DE VERTEDORES ESCALONADOS.

La incorporación del método PSO en el diseño de un vertedor escalonado para el caso práctico de este proyecto, tuvo como objetivo la optimización de tres valores principalmente: Disipación de energía, Altura del escalón y Huella del escalón. Siguiendo un procedimiento estándar de diseño con restricciones teóricas que permitan el funcionamiento adecuado de dicha estructura y adecuando a su vez el método PSO para asegurar una óptima convergencia a través de sus iteraciones.

La implementación fue realizada en el programa MATLAB, con la ayuda de contenido disponible en diversos foros y se dividió en diferentes etapas primordiales, las cuales se explican a continuación.

4.1 Diseño del vertedor Escalonado

4.1.1 Parámetros del vertedor Escalonado.

Se establecieron los principales valores que describen las características de la estructura, a partir de los cuales se diseña el vertedor. Siendo estos:

- Gasto de Diseño.
- Altura del Vertedor.
- Pendiente de la Rápida.
- Anchura del Vertedor.

4.1.2 Condiciones y restricciones

Además de la condición fundamental respecto al valor de energía disipada, se plantearon restricciones que definieron los valores de castigo a ser

empleados en la función aptitud. Para un vertedor escalonado las restricciones a tomar en cuenta son las siguientes:

$$\frac{P}{y_c} \leq 10$$

La expresión asegura que el funcionamiento de la rápida del vertedor escalonado opere con una mayor disipación que un vertedor de rápida lisa.

$$0.43 \cdot y_c > h \geq 15 * y_c \cdot \cos\alpha$$

El límite inferior de la expresión asegura que no existan problemas de cavitación y el límite superior asegura una rugosidad adecuada.

$$P > \frac{H_e}{Y_c}$$

La relación previene la formación de un flujo no uniforme.

$$0.25 \leq \frac{h}{Y_c} \leq \frac{h}{Y_{cs}}$$

La relación h/y_c dentro de los parámetros señalados permite la obtención de un flujo rasante.

4.1.3 Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño del vertedor escalonado empleado, se describe en el capítulo II.

4.1.4 Función de aptitud

Se definen los coeficientes de peso o penalización para las restricciones y condiciones mencionadas en apartados anteriores, otorgándoles valores que reflejen la importancia de su cumplimiento. Y se aplican a la función aptitud establecida en este trabajo, la cual es la siguiente:

$$Fa = \frac{Q_d}{1 + \Delta E \cdot CE + CH + CF + CP + CHYC}$$

Dónde:

- Q_d es el gasto de diseño (m^3/s).
- ΔE es la energía disipada (m).
- CE es el coeficiente de peso para el valor de ΔE con respecto a su óptimo.
- CP es el coeficiente de peso para el valor de P/y_c con respecto a su óptimo.
- CH es el coeficiente de peso para el valor de h con respecto a sus valores máximos y mínimos.
- CF es el coeficiente de peso para el valor de P/y_c con respecto a H_e/y_c .
- $CHYC$ es el coeficiente de peso para el valor de H/y_c con respecto al rango preferente.

4.2 Método PSO

4.2.1 Definición del problema

Se correlacionan los parámetros del problema con las condiciones de operación del PSO. Asociando en primera instancia la función de aptitud,

posteriormente el número de variables de decisión y los límites inferiores y superiores de las variables de decisión.

4.2.2 Parámetros del PSO

Se fijan los parámetros que determinan las características fundamentales del enjambre de partículas. Las cuales son el Máximo Número de Iteraciones, Número de Población, Coeficiente de Inercia, Coeficiente de Amortiguamiento, Coeficiente Personal de Aceleración y Coeficiente Social de Aceleración con sus respectivos límites máximos y mínimos.

4.2.3 Inicio

En esta sección se implementan procesos necesarios para dar comienzo al algoritmo PSO. Creando una población, asentando la posición inicial de partícula, así como los valores de mejor personal y mejor global, para su posterior evaluación. Todos estos valores van a ser guardados en matrices de valores, ya que cada una de las partículas del proceso es por sí misma una de estas estructuras.

En este trabajo los valores conservados en estas matrices son la posición de partícula, velocidad de partícula, valor de aptitud, mejor posición personal, mejor valor de aptitud personal.

4.2.4 Planteamiento de mejor global inicial

En este caso, para que los valores obtenidos de las iteraciones iniciales sean considerados como mejores globales el valor con el que se comparan inicialmente es 0, también se puede utilizar menos infinito.

$$\mathbf{GlobalMejor.Aptitud} = -inf$$

4.2.5 Implementación del proceso de competencia

En la primera iteración se genera una solución al azar, con posición y velocidad aleatoria, para que este primer valor, al ser comparado con menos infinito, se convierta en la primera solución.

Una vez establecido el mejor global inicial, y los procesos necesarios para la creación de matrices de solución y mejores personales, se formulan los mecanismos de competencia que permitan la actualización del mejor global conforme transcurren las iteraciones. Esto se logra a través de la comparación del mejor valor de aptitud global con el mejor valor de aptitud personal al momento de la evaluación; donde, si el mejor valor de aptitud personal satisface de mejor manera la solución del problema, el mejor valor de aptitud global es sustituido por este último.

$$\mathbf{particula(i).Mejor.Posicion} = \mathbf{particula(i).posicion}$$

$$\mathbf{particula(i).Mejor.Aptitud} = \mathbf{particula(i).aptitud}$$

$$\mathbf{if\ particula(i).Mejor.Aptitud} > \mathbf{GlobalMejor.Aptitud}$$

$$\mathbf{GlobalMejor} = \mathbf{particula(i).Mejor}$$

4.2.6 Iteración principal de PSO

Este ciclo se encarga de llevar a cabo el procedimiento iterativo desde la primera hasta la última iteración, con todas las partículas; a través de los cálculos pertenecientes a la metodología del PSO presentada en el capítulo III.

- a) Actualización de velocidad.
- b) Actualización de límites.
- c) Actualización de posición.
- d) Evaluación.
- e) Actualización del mejor personal.
- f) Actualización del mejor global.

4.2.7 Mostrar evaluación de iteración

En este paso es necesario asegurarse de que se presente el progreso del procedimiento, mediante la iteración actual y el mejor global presente en dicha iteración.

4.2.8 Amortiguamiento del coeficiente de inercia

Se define el coeficiente de amortiguamiento, el cual reduce el coeficiente de inercia durante las iteraciones, mejorando el rendimiento del proceso de optimización. Dado que se empleó la variación con coeficientes de constricción, el coeficiente de amortiguamiento empleado es 1, de no usarse, el valor estándar es 0.99.

4.2.9 Coeficientes de constricción

Existen configuraciones conocidas que mejoran el proceso de búsqueda del PSO, una de ellas mencionada en el capítulo III es la de coeficiente de constricción propuesta por Clerc y Kennedy en 2002. Y es definida por

$$\kappa = 1$$

$$\varphi_1 = 2.05$$

$$\varphi_2 = 2.05$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

$$\chi = \frac{2\kappa}{\text{abs}(2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi})}$$

$$w = \chi$$

$$c_1 = \chi \cdot \varphi_1$$

$$c_2 = \chi \cdot \varphi_2$$

4.3 Resultados

Se crea una figura que presente los resultados obtenidos a través de las iteraciones con respecto al valor de la función de aptitud. Con el fin de que dicha grafica cumple el propósito de demostrar el progreso del algoritmo.

CAPÍTULO V

EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Para el diseño del vertedor se elaboró el siguiente ejemplo, para el cual se diseña la geometría de la rápida.

Se establecen los parámetros para los cuales se diseña:

Qdis (m³/s)	4500
P (m)	10
M	1.25
b (m)	744.53
q (m²/s)	6.044082

A través del método PSO descrito en los capítulos III Y IV se realiza el proceso de optimización. A continuación se muestran cuatro diferentes simulaciones con los mejores valores de aptitud (Fa) global obtenidos con respecto a la iteración bajo la cual se calcularon. Las iteraciones se ejecutaron en MATLAB con una población de 200 partículas a través de 20 iteraciones.

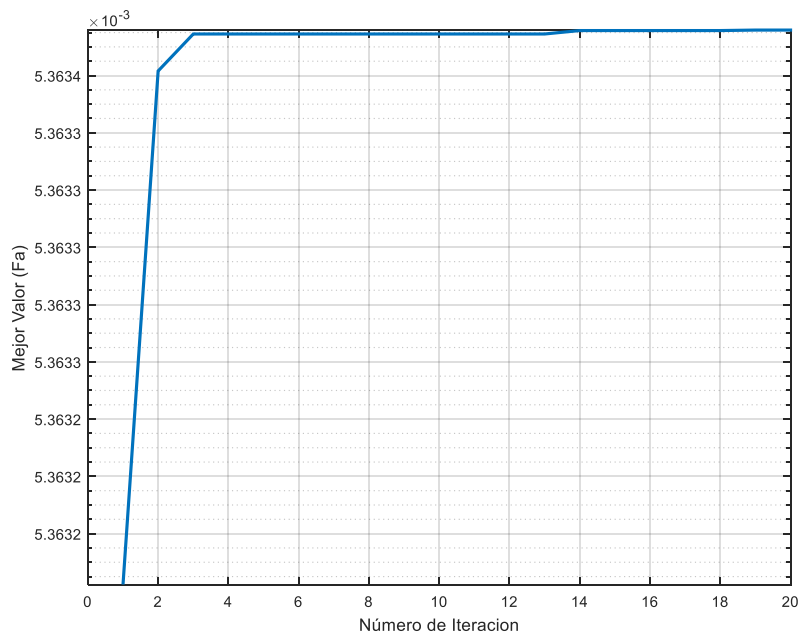


Figura 1. Prueba de PSO No.1

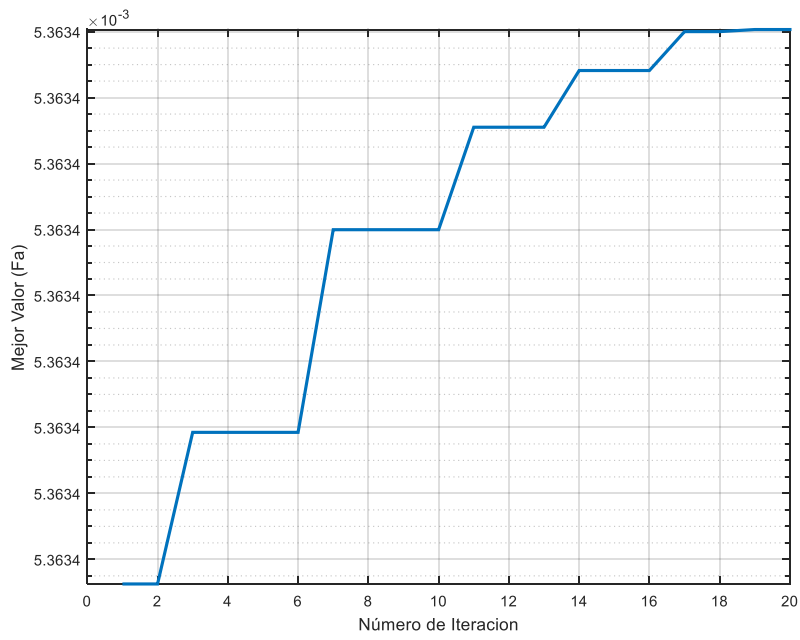


Figura 2. Prueba de PSO No.2

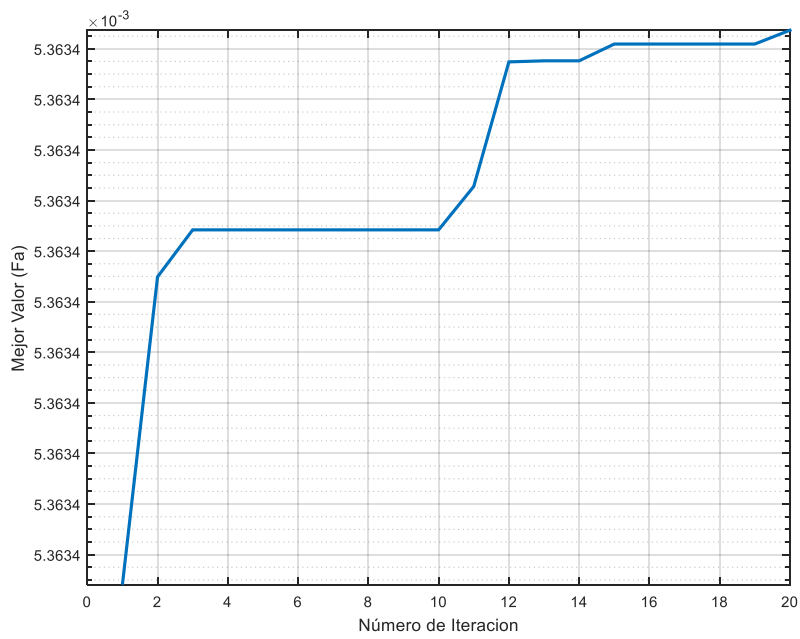


Figura 3. Prueba de PSO No.3

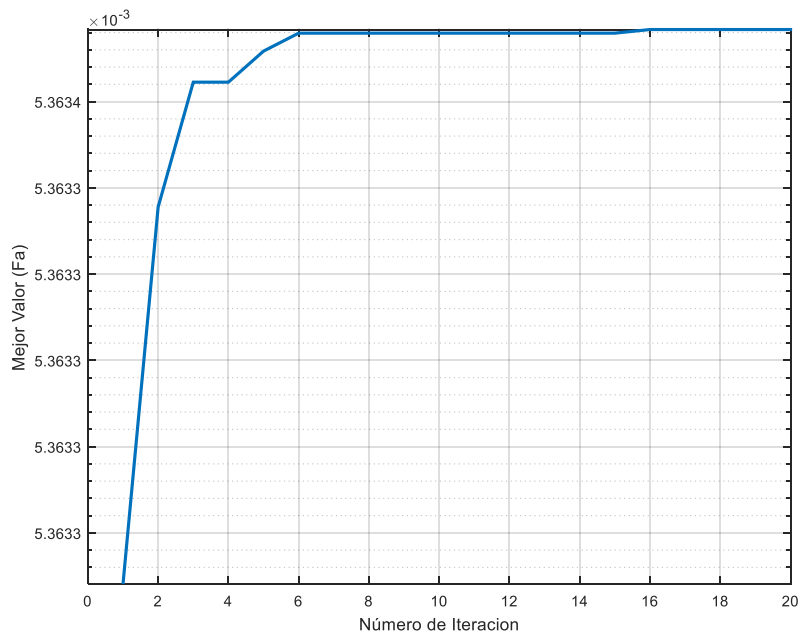


Figura 4. Prueba de PSO No.4

Por lo que se entiende que el mejor valor de aptitud (Fa) es 0.005363377. Este valor de Fa corresponde a un vertedor escalonado con una altura de escalón (h) de 0.6665 m y una huella de escalón (l) de 0.5332 m. El resto de los valores propios de un vertedor de esta geometría se presentan a continuación:

Alpha	51.34
AlphaR	0.90
yc	1.55
P/YC	6.45
HYC	0.43
HYCS	1.21
HEYC	4.94
HE	7.65
A	0.45
FMAX	0.23
d	0.51
V	11.75
ERES	7.35
C	0.62

Y90	1.36
Fa	0.01

Por último, se debe dejar en claro que debido al método constructivo que implica tongadas de múltiplos de 0.3 m, el valor de altura de escalón es tentativo; siendo la más sensible opción optar por un valor de alrededor de 0.6 m, que permita la adecuada puesta en obra.

COCLUSIONES GENERALES

El diseño de vertedores escalonados es un campo que aún tiene muchas áreas de oportunidad, después de todo, fue hasta el último cuarto del siglo XX cuando su implementación como una alternativa se volvió viable gracias al Concreto Compactado con Rodillo. Es por ello que es crucial que para su desarrollo se lleve a cabo el trabajo en conjunto entre múltiples disciplinas, con el fin de ofrecer soluciones viables y apropiadas a los numerables desafíos presentes.

Existen diferentes técnicas de optimización de sistemas y de diseño de vertedores escalonados, todas con sus respectivas fortalezas pero para propósitos de este trabajo se recurrió a la metodología establecida por Ohtsu et al. Presentada en 2004, expuesta en el capítulo II, en conjunto con la metodología de Optimización por Enjambre de partículas (PSO) propuesta por el doctor Kennedy, J. y Eberhart, R. C. en 1995, expuesta en el capítulo III, con el fin de identificar el valor óptimo de altura de escalón en relación a la pérdida total de energía; a partir de una función objetivo delimitada por las restricciones teóricas del funcionamiento de vertedores escalonados.

La metodología PSO es sumamente eficiente en la exploración y explotación del hiperespacio en búsqueda de posibles soluciones, además de ello la convergencia tiende a ocurrir en un menor número de iteraciones con respecto a otros métodos de optimización, y su implementación es relativamente sencilla. Por lo que para el tipo de problema presente en este trabajo, dicha metodología es suficiente, en especial si se considera que se empleó la variación que contiene el coeficiente de constricción, de uso común en la práctica, el cual, de acuerdo a la teoría, asegura la convergencia en un punto estable. También es importante resaltar la importancia de la función objetivo creada específicamente para este trabajo, la cual contiene los parámetros y restricciones estándar propias de un vertedor escalonado, necesarias para la adecuada operación de dicha estructura, evitando así, problemas de funcionamiento hidráulico y cavitación.

Las simulaciones realizadas en MATLAB fueron satisfactorias, alcanzando el objetivo de convergencia con respecto a un óptimo teórico, siendo ejecutadas con una población de 200 partículas a través de 20 iteraciones. Repitiendo el proceso hasta 5 veces, confirmando que el valor de aptitud obtenido coincidiera. La altura de escalón obtenida en relación con el valor de aptitud está comprendida dentro del rango de altura de escalón permisible.

Al finalizar los cálculos referentes al diseño del vertedor escalonado, se concluyó que la optimización fue efectiva en el hallazgo de un valor de altura de escalón óptimo. Aunque cabe señalar la crucial importancia de modelos físicos en la comprobación del comportamiento hidráulico de vertedores escalonados, la cual es reiterada no solo en este trabajo, sino en prácticamente cualquier otra literatura en relación al diseño de dichas estructuras, esto es debido a que si bien el entendimiento sobre su funcionamiento ha progresado de manera exponencial en años recientes, aún existen ciertos aspectos relevantes faltos de consenso y certeza.

Referencias Bibliográficas

- ACI. 2011. *Report on roller-compacted mass concrete*. American Concrete Institute, 2011. ACI 207.5R-11.
- Amador, A., Sánchez-Juny, M. & Dolz, J. 2006. *Diseño Hidráulico de aliviaderos escalonados en presas de HCR*. Ingeniería del agua. 13 (3), 289-301.
- Arreguín, F. 2000. *Obras de excedencia*. México DF, México. IMTA.
- ASTM. 2000. *Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates*. American Society for Testing and Materials. 2001. ASTM C125-00a.
- Bai, Q. 2010. *Analysis of particle swarm optimization algorithm*. Computer and Information Science. 3 (1), 180-183.
- Bianchini. 2018. *Sistemas de corrección fluvial: Muros de contención*. Catálogo: Gabions. Bianchini ingeniero.
- Chanson, H. 2000. *Historical development of stepped cascades for the dissipation of hydraulic energy*. Transactions of the Newcomen Society. 72 (2000-2001), 295-318.
- Chanson, H. 2002. *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. The Brisbane, Australia. Balkema Publishers, University of Queensland.

- Coello, C. 2004. *Introducción a la computación evolutiva*. México DF, México. Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN.
- Cordero, D., Elviro, V. & Granell C. 2007. *Aliviaderos en laberinto. Presa de María Cristina*. Madrid, España. Laboratorio de hidráulica, CEDEX.
- Eiben, A.E. & Schoenauer, M. 2002. *Evolutionary computing*. Information Processing Letters. 82(2002). 1-6.
- Engelbrecht, A. 2007. *Computational intelligence*. Pretoria, South Africa. University of Pretoria, John Wiley & Sons.
- Frizell, K. 2006. *Research state of the art and needs for hydraulic design of stepped spillways*. Denver, United States of America. Department of the Interior. United States Bureau of Reclamation (USBR).
- Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J. & Pazos, A. 2010. *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética*. Coruña, España. Universidade da Coruña.
- González, C. & Chanson, H. 2007. *Diseño hidráulico de vertedores escalonados con pendientes moderadas: Metodología basada en un estudio experimental*. Ingeniería hidráulica en México. XXII (2), 5-20.
- Hager, W. & Pfister, M. 2013. *Stepped spillways: Technical advance from 1900*. Proceedings of 2013 IAHR World Congress.
- Hansen, K. & Reinhardt, W. 1991. *Roller-compacted concrete dams*. United States of America. McGraw Hill.

- Kennedy, J & Eberhart, R. 1995. *A new optimizer using particle swarm theory*. IEEE.
- Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite, M. & Boillat, L. 2009. *Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France*. Switzerland. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Londoño, C & Cipriano, A. 1992. *Presas de concreto compactado con rodillo*. Colombia. Instituto Colombiano de Productores de Cemento.
- Luke, S. 2013. *Essentials of metaheuristics*. United States of America. Lulu, second edition.
- Maccaferri. 2015. *Reno mattresses: Galfan & PVC coated*. Technical data sheet. June (2).
- Maccaferri. 2017. *Canales en colchones Reno y gaviones revestidos con argamasa: Necesidades y soluciones*. Certificado de conformidad con la norma ISO 9001.
- Mawlood, Y. & Peerdawood, C. 2010. *Analytical study for stability of gabion walls*. Journal of Pure and Applied Sciences / Salahaddin University. 22 (5), 21-34.
- Millionas, M. 1994. *Swarms, phase transitions, and collective intelligence; and a nonequilibrium statistical field theory of swarms and other spatially extended complex systems*. New Mexico, United States of America. Santa Fe Institute & Los Alamos National Laboratory.

- Niklas, K. & Kutschera, U. 2004. *The modern theory of biological evolution: An expanded synthesis*. The science of Nature. (91), 255-276. DOI: 10.1007/s00114-004-0515-y.
- Palupi, D., Shamsuddin, S. & Yuhaniz, S. 2011. *Particle swarm optimization: Technique, system and challenges*. International Journal of Computer Applications. 14 (1). 19-24.
- Reeves, C. 1993. *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. Great Britain. John Wiley & Sons.
- Rendón, G. 2011. *Diseño de vertederos escalonados*. DF, México. Instituto Politécnico Nacional.
- Santaella, L. 1999. *Comentarios sobre el concreto compactado con rodillo (CCR)*. Universidad Militar Nueva Granada, Revista de la Facultad de Ingeniería. Noviembre, 10-21.
- Sotelo, G. 1994. *Apuntes de hidráulica II*. México DF, México. UNAM, Facultad de Ingeniería.
- USBR. 2017. *Design and construction considerations for hydraulic structures. Roller compacted concrete*. Denver, United States of America. Department of the Interior. United States Bureau of Reclamation (USBR).
- Yarpiz. 2018. *Particle Swarm Optimization (PSO) in MATLAB*. YARPIZ

