

## APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ

## 圣克鲁斯河水电开发项目

PROVINCIA DE SANTA CRUZ – ARGENTINA

圣克鲁斯省-阿根廷

## SIMULACIÓN DE OPERACIÓN DE EMBALSE Y DESPACHO DE POTENCIA Y ENERGÍA DEL APROVECHAMIENTO DEL RÍO SANTA CRUZ

## 圣克鲁斯河水利开发项目电力 和能源调度及水库运行模型

作者: Sergio Oscar Liscia, María Mercedes Del Blanco, Juan Manuel Galíndez

Traducido por He Zhao

译者: 赵贺





Simulación de operación de embalse y despacho de  
potencia y energía del aprovechamiento  
del río Santa Cruz

圣克鲁斯河水利开发项目电力和能源  
调度及水库运行模型。

Sergio Oscar Liscia  
María Mercedes Del Blanco  
Juan Manuel Galíndez

Traducido por  
He Zhao  
译者: 赵贺

Liscia, Sergio Oscar

Simulación de operación de embalse y despacho de potencia y energía del aprovechamiento del río Santa Cruz: 圣克鲁斯河水利开发项目电力和能源调度及水库运行模型 / Sergio O. Liscia; M. Mercedes Del Blanco; Juan M. Galíndez; contribuciones de M. Julieta Buscetti; Milagros Loguercio; coordinación general de Sergio Oscar Liscia; Editado por María Mercedes Del Blanco; Juan Manuel Galíndez. - 2a edición bilingüe. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2025.  
Libro digital, PDF.

Traducción de: He Zhao. ISBN 978-950-34-2520-6 1. Embalse. 2. Santa

Cruz. 3. Energía Hidráulica. I. Buscetti, María Julieta, colab. II. Loguercio, Milagros, colab. III. Liscia, Sergio Oscar, coord. IV. Del Blanco, María Mercedes, ed. V. Galíndez, Juan Manuel, ed. VI. Zhao, He, trad. VII. Título.  
CDD 621.2

## **Simulación de operación de embalse y despacho de potencia y energía del aprovechamiento del río Santa Cruz**

圣克鲁斯河水利开发项目电力和能源调度及水库运行模型。

Sergio Oscar Liscia, María Mercedes Del Blanco, Juan Manuel Galíndez



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA**

Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2024.

拉普拉塔国立大学，工程系，2024

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723.

第 11.723 号法律规定的保证金已缴纳。

© Universidad Nacional de La Plata

### **Coordinador**

协调人

Sergio Oscar Liscia <sup>1</sup>

### **Autores**

作者

Sergio Oscar Liscia

María Mercedes Del Blanco<sup>1</sup>

Juan Manuel Galíndez <sup>1</sup>

### **Colaboradores**

合作出版

Milagros Loguercio †<sup>1</sup>

María Julieta Buscetti <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de La Plata

拉普拉塔国立大学



# Índice

## 目录

Introducción	
引言	1
Descripción del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz	
圣克鲁斯和水利开发项目的描述	3
Modelo de simulación de embalse	
水库模拟模型	11
3.1 Conceptos generales de la modelación de embalses	
水库建模的基本概念	11
3.2 Datos básicos	
基础数据	13
3.2.1 Régimen hidrológico del río	
河流的水文特征	14
3.2.2 Dimensiones de los embalses y la regulación hidrológica	
水库规模与水文调节	15
3.2.3 Definición de los niveles operativos	
运行水位的确定	16
3.2.4 Conceptos de potencia y energía	
功率与能源的概念	18
3.2.5 Condiciones de operación	
运行条件	21
3.2.6 Características de las turbinas	
水轮机特点	23
3.3 Ecuaciones básicas y esquema numérico de una central con regulación	
有调节能力电站的基本公式和数据	25
3.3.1 Incorporación de las características del equipamiento electromecánico	
纳入相关机电设备功能	30
3.3.2 Consideraciones adicionales	
其他考虑因素	34
3.4 Esquema numérico de una central sin regulación	
无调节能力的水电站数值	36

3.5 Selección del número de turbinas activas	
选择运行中涡轮机的数量 . . . . .	39
Aplicación del modelo al aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz	
圣克鲁斯河水力发电站的模型应用	43
4.1 Condiciones particulares de los embalses sobre el río Santa Cruz	
圣克鲁斯水库的特定条件 . . . . .	44
4.1.1 Serie hidrológica del río Santa Cruz	
圣克鲁斯河的水文系列 . . . . .	45
4.1.2 Datos meteorológicos	
气象数据 . . . . .	46
4.1.3 Relaciones nivel-área y nivel-volumen	
水位-面积与水位-体积关系 . . . . .	46
4.1.4 Niveles de operación	
运行水位 . . . . .	48
4.1.5 Ley de restitución	
尾水法则 . . . . .	49
4.1.6 Pérdidas de energía hidráulica	
水力损失 . . . . .	49
4.1.7 Diagramas de explotación de las turbinas	
水轮机运行图 . . . . .	52
4.2 Central NK: Hipótesis de simulación	
NK 水电站 : 模拟假设 . . . . .	53
4.3 Central NK: Resultados	
NK 水电站 : 结果 . . . . .	58
4.3.1 Matrices de operación	
运行矩阵 . . . . .	61
4.3.2 Factor de planta	
运行系数 . . . . .	64
4.3.3 Curvas de duración	
持续曲线 . . . . .	66
4.3.4 Energía media anual	
年均能量 . . . . .	67
4.4 Central JC: Hipótesis de simulación	
JC 水电站 : 模拟假设 . . . . .	68
4.5 Central JC: Resultados	
JC 水电站 : 结果 . . . . .	70
4.5.1 Matrices de operación	
运行矩阵 . . . . .	70
4.5.2 Factor de planta	
运行系数 . . . . .	70

4.5.3	Curvas de duración	
	持续时间曲线 . . . . .	72
4.5.4	Energía media anual	
	年均能量 . . . . .	73
Conclusiones		
	结论	75
Referencias		
	参考书目	77

# Lista de figuras

## 图表索引

2.1	Ubicación del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz (presas NK y JC), hidrografía de la zona y localidades aledañas 圣克鲁斯河水利枢纽工程、内斯托尔·卡洛斯·基什内尔总统电站（孔多克里夫）和豪尔赫·塞佩尼克省长电站（拉巴朗克萨）的位置：平面图（上），剖面图（下） . .	3
2.2	Perfil longitudinal del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz 圣克鲁斯河水力发电的地质剖面图 . . . . .	4
2.3	Esquema general de la presa NK NK 大坝的总体示意图 . . . . .	4
2.4	Sección transversal de la presa NK NK 大坝的横截面图 . . . . .	5
2.5	Corte transversal de las obras de descarga (vertedero, descargadores de fondo y medio fondo, y desvío) de la presa NK NK 大坝的泄水工程（溢洪道、泄水底孔、中孔及导流孔）的横截面图 . . . . .	5
2.6	Corte transversal de la central de la presa NK NK 大坝电站的横截面图 . . . . .	5
2.7	Esquema general de la presa JC JC 大坝总体示意图 . . . . .	7
2.8	Sección transversal de la presa JC JC 大坝的横截面图 . . . . .	8
2.9	Corte transversal de las obras de descarga (vertedero, descargadores de fondo y medio fondo, y desvío) de la presa JC 泄水结构典型详图（溢洪道和泄水底孔）-省长电站 . . . . .	8
2.10	Corte transversal de la central de la presa JC JC 大坝电站的横截面 . . . . .	9



3.1	Serie hidrológica y caudales característicos	
	水文序列和特征流量 . . . . .	15
3.2	Esquema general de una presa con el detalle de sus niveles operativos	
	大坝总体示意图及其运行水位详图 . . . . .	17
3.3	Cantidades de energía firme y -ocasionalmente- secundaria generadas durante un día ordinario	
	日产生的固定电能与某天偶尔产生的二次电能。 . . . .	20
3.4	Cantidades de energía generada y disipada durante un día en un periodo de excedencia	
	一天中不同时段所产生及消除的能量 . . . . .	20
3.5	Cantidad de energía generada durante un día en un periodo de falla	
	一天中故障时段内所产生的能量 . . . . .	21
3.6	Diagrama colinar en términos de $N_{11}$ y $Q_{11}$ (extraído de Wylie y Streeter, 1978)	
	$N_{11}$ 和 $Q_{11}$ 对比图 (山丘图) (摘自 Wylie 和 Streeter, 1978) . . . . .	23
3.7	Curvas características adimensionales (extraído de Wylie y Streeter, 1978)	
	尺寸特点曲线 (摘自 Wylie 和 Streeter, 1978) . . . . .	25
3.8	Demanda diaria de potencia	
	每日电力需求图 . . . . .	27
3.9	Esquema de cálculo del modelo de simulación de embalse con regulación	
	带调节的水库模拟模型计算流程图 . . . . .	29
3.10	Corrección del nivel del embalse por los niveles máximo (izq.) y mínimo (der.) normales a lo largo del $i$ -ésimo intervalo de tiempo $\Delta t$ . Asumiendo que el nivel del embalse varía linealmente a lo largo de ese lapso, pueden calcularse asimismo el tiempo durante el cual es posible generar potencia secundaria, por un lado ( $\Delta T_S = (N'_{emb} - NM_{a}N) \Delta t / (N'_{emb} - N_{emb})$ ), y el tiempo de falla ( $\Delta T_{FF} = (NM_{i}N - N'_{emb}) \Delta t / (N_{emb} - N'_{emb})$ ), por el otro	
	根据第 $i$ 个时间间隔 $t$ 的正常最高 (左) 和最低 (右) 水位校正水库水位。假设水库水位在该时间跨度内呈线性变化, 则可计算出一个水库可进行二次发电的时间 ( $\Delta T_S = (N'_{emb} - NM_{a}N) \Delta t / (N'_{emb} - N_{emb})$ ), 以及故障时间 ( $\Delta T_{FF} = (NM_{i}N - N'_{emb}) \Delta t / (N_{emb} - N'_{emb})$ ) . . . . .	30
3.11	Factor de utilización para distintos esquemas de despacho de potencia: izq.: $F_u < 1$ : generación en punta; centro: $F_u < 1$ : generación combinada de base y en punta; der.: $F_u = 1$ : generación de base	
	不同电力调度方案的使用系数: 左图: $F_u < 1$ : 高峰发电量; 中图: $F_u < 1$ : 基本发电量和高峰发电量之和; 右图: $F_u = 1$ : 基本发电量 . . . . .	35

3.12 Rangos de explotación de una serie de grupos de turbinas. El solapamiento de regiones correspondientes a grupos de distintos números de unidades encendidas permite adaptar la magnitud de la generación a la decreciente potencia disponible. Las brechas entre las regiones de 1 y 2 turbinas activas fuerzan una regulación intradiaria del embalse	
若干水轮机组的运行范围。与不同数量的机组相对应的区域重叠，可以使发电量适应不断减少的可用功率。1 台和 2 台有功水轮机区域之间的间隙迫使水库进行日间调节	37
3.13 Esquema de cálculo del modelo de simulación de embalse sin regulación	
无调节水库模型的计算图表	38
3.14 Bloque correspondiente a la selección del número de turbinas activas	
运行水轮机数量选择模块	39
3.15 Bloque correspondiente a la regulación intradiaria (Fig. 3.14)	
日内调节模块（对应图 3.14）	40
4.1 Esquema del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz	
圣克鲁斯河水力发电开发示意图	43
4.2 Serie hidrológica del río Santa Cruz registrada en la estación Charles Fuhr	
在 Charles Fuhr 站记录的圣克鲁斯河水文系列	45
4.3 Datos medios mensuales de evaporación y precipitación [mm]	
月均蒸发量和降水量数据 [mm]	47
4.4 Leyes nivel-volumen (azul) y nivel-área (rojo) correspondientes a las presas NK (izq.) y JC (der.)	
水位-体积关系（蓝色）与水位-面积关系（红色），对应 NK 水坝（左）和 JC 水坝（右）	48
4.5 Leyes nivel de restitución versus caudal correspondientes a las presas NK (rojo) y JC (azul)	
尾水水位与流量关系，分别对应 NK 水坝（红色）和 JC 水坝（蓝色）	50
4.6 Diagrama colinar de las turbinas de la central NK, obtenido por ensayos en modelo físico (reproducido con autorización de Harbin Electrical Corporation, República Popular China)	
NK 水电站水轮机等高性能图，数据源自中国哈电集团的物理模型试验	52
4.7 Diagrama colinar de las turbinas de la central JC, obtenido por ensayos en modelo físico (reproducido con autorización de ZheFu Tonglu, República Popular China)	
JC 水电站水轮机等高性能图，数据源自中国浙富的物理模型试验	53
4.8 Rangos de explotación de las centrales NK (izq.) y JC (der.) para distintos números de turbinas activas. Las brechas entre las regiones de 1 y 2, y 2 y 3 turbinas activas en la central NK fuerzan una regulación intradiaria del embalse	
NK（左）和 JC（右）水电站在不同水轮机运行数量下的运行范围。NK 水电站中 1 台与 2 台、2 台与 3 台水轮机运行范围之间的间隙要求水库进行日内调节	54

4.9	Esquema de la central hidroeléctrica NK	
	NK 水电站示意图 . . . . .	54
4.10	Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 1 bajo condiciones normales de operación. La central provee la potencia instalada durante un cierto periodo del día	
	在正常运行条件下，对应场景 1 的日间发电功率图，。电站在一天的特定时段内输出安装功率 . . . . .	55
4.11	Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 1 bajo condiciones de excedencia. La central es capaz de proveer la potencia instalada durante periodos más prolongados respecto del propio de condiciones normales de operación	
	汛期条件下对应场景 1 的每日功率生成图。与正常运行条件相比，电站能够在更长的时间段内提供装机功率 . . . . .	56
4.12	Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 1 bajo condiciones de falla. La central se ve imposibilitada de proveer la potencia instalada durante el lapso propio de condiciones normales de operación, por lo cual el tiempo de generación se torna más exiguo hasta que el factor de utilización iguala a 0,25. La ulterior reducción de la generación se produce, primero, a expensas del cierre del distribuidor de las turbinas y, luego, del apagado sucesivo de estas	
	故障条件下对应场景 1 的每日功率生成图。在正常运行条件下，电站无法提供装机功率，因此发电时间缩短，直到利用系数降至 0.25。进一步的发电量减少首先通过关闭水轮机导水机构实现，随后逐步关闭水轮机 . . . . .	56
4.13	Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 2 bajo condiciones normales de operación. La central provee la potencia instalada durante un cierto periodo del día y una potencia mínima durante el tiempo remanente	
	在正常运行条件下，场景 2 的每日发电功率图。电站在一天中的某段时间内提供装机功率，其余时间提供最小功率 . . . . .	57
4.14	Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 3 bajo condiciones de normales de operación. La central opera cual si no tuviera capacidad de regulación, de tal manera que la potencia generada corresponde al caudal que fluye a través del río	
	在正常运行条件下，场景 3 的每日发电功率图。电站的运行就像没有调节能力一样，因此发电功率对应于通过河流的流量 . . . . .	58
4.15	Movimiento del embalse (en azul) y generación de potencia media diaria (en rojo) a lo largo del periodo analizado considerando las condiciones de operación correspondientes al Escenario 1	
	水库变化（蓝色）与日均发电功率（红色）随分析期间的变化趋势（基于场景 1 的运行条件） . . . . .	59



4.16 Movimiento del embalse y balance de caudales durante un año medio (1996)	
1996 年平均年份中水库变化与流量平衡 . . . . .	59
4.17 Movimiento del embalse y balance de caudales durante un año seco (1971)	
干旱年份（1971 年）期间水库水位变化和流量平衡 . . . . .	60
4.18 Movimiento del embalse y balance de caudales durante un año húmedo (2013)	
（2013 年）期间水库水位变化和流量平衡 . . . . .	61
4.19 Movimiento del embalse (en azul) y generación de potencia media diaria (en rojo)	
a lo largo del periodo analizado considerando las condiciones de operación correspondientes al Escenario 2	
在分析周期内，基于场景 2 的运行条件，水库的水位变化（蓝色）与每日平均发电量（红色） . . . . .	61
4.20 Movimiento del embalse (en azul) y generación de potencia media diaria (en rojo)	
a lo largo del periodo analizado considerando las condiciones de operación correspondientes al Escenario 3	
在分析周期内，基于场景 3 的运行条件，水库的水位变化（蓝色）与每日平均发电量（红色） . . . . .	62
4.21 Matriz de operación de las turbinas de la presa NK correspondiente al Escenario 1	
对应场景 1 的 NK 水坝水轮机操作矩阵 . . . . .	63
4.22 Matriz de operación de las turbinas de la presa NK correspondiente al Escenario 2	
对应场景 2 的 NK 水坝水轮机操作矩阵 . . . . .	64
4.23 Matriz de operación de las turbinas de la presa NK correspondiente al Escenario 3	
NK 水坝水轮机对应场景 3 的运行矩阵 . . . . .	65
4.24 Curvas de duración correspondientes a los tres escenarios analizados	
对应于分析的三个场景的持续曲线 . . . . .	66
4.25 Esquema de la central hidroeléctrica JC	
JC 水电站示意图 . . . . .	68
4.26 Diagrama de generación de potencia a lo largo del día bajo condiciones de normales de operación. La central opera cual si no tuviera capacidad de regulación, de tal manera que la potencia generada corresponde al caudal que fluye a través del río	
正常运行条件下全天发电量示意图。发电站在没有调节能力的情况下运行，发电量与河流流量相对应。 . . . . .	69
4.27 Matriz de operación de las turbinas de la presa JC (asumiendo su operación aislada)	
JC 水坝涡轮运行矩阵（假设其独立运行） . . . . .	71
4.28 Matriz de operación de las turbinas de la presa JC (asumiendo su operación conjunta con la presa NK)	
JC 水坝涡轮运行矩阵（假设其与 NK 水坝联合运行） . . . . .	71
4.29 Curvas de duración correspondientes a los tres escenarios analizados	
对应于三个分析场景的持续时间曲线 . . . . .	73

# Lista de tablas

## 表格目录

2.1	Características principales de la presa NK	
	NK 大坝的主要特性 . . . . .	6
2.2	Características principales de la presa JC	
	JC 大坝的主要特性 . . . . .	10
4.1	Volumen y área expuesta del embalse NK como función del nivel de embalse	
	NK 水库的容积和暴露面积与水位的函数关系 . . . . .	47
4.2	Volumen y área expuesta del embalse JC como función del nivel de embalse	
	JC 水库的容积和暴露面积与水位的函数关系 . . . . .	48
4.3	Ley nivel de restitución versus caudal de la presa NK	
	NK 水坝回水水位与流量关系 . . . . .	49
4.4	Ley nivel de restitución versus caudal de la presa JC	
	JC 大坝的尾水水位与流量的关系 . . . . .	50
4.5	Pérdidas de energía hidráulica de la presa NK	
	NK 水坝的水力能量损失 . . . . .	51
4.6	Pérdidas de energía hidráulica de la presa JC	
	JC 水坝的水力能量损失 . . . . .	51



# CAPÍTULO 1

## 第一章

### Introducción

#### 引言

El río Santa Cruz, ubicado en la provincia homónima, en el sur de la Patagonia argentina, nace en el Campo de Hielo Patagónico Sur, de las orillas del lago Argentino. Su caudal se nutre del aporte de los glaciares, las lluvias y el deshielo, y en su curso interactúa con una gran cantidad de lagos y lagunas en dirección hacia el oeste para encontrar su destino final en el océano Atlántico, luego de atravesar toda la provincia.

圣克鲁斯河位于阿根廷巴塔哥尼亚南部的圣克鲁斯省，发源于阿根廷湖沿岸的南巴塔哥尼亚冰原。冰川、降雨和融雪为圣克鲁斯河提供了水源，圣克鲁斯河在沿途与大量湖泊相互作用，向西流去，在穿越整个巴塔哥尼亚省之后，最终汇入大西洋。

Los aprovechamientos hidroeléctricos del río Santa Cruz son proyectos de larga data que se encuentran actualmente en construcción. Constan de dos presas con sendas centrales hidroeléctricas y estructuras de seguridad: la central Presidente Dr. Néstor Kirchner, emplazada a 127 km de la naciente del río Santa Cruz, y la central Gobernador Jorge Cepernic, ubicada 70 km más aguas abajo.

圣克鲁斯河上的水电开发项目是正在建设中的长期项目。它们由两座大坝组成，大坝上建有水电站和安全结构，分别是：内斯托·基什内尔总统电站，位于距圣克鲁斯河源头 127 公里处；豪尔赫·塞贝尼克省长电站，位于下游 70 公里处。

El inicio de las obras, en el año 2015, cierra una etapa que incluye varias actualizaciones del proyecto, en respuesta a los cambios que las matrices energéticas y los abordajes que los temas ambientales han impuesto. En efecto, el proyecto concebido para la licitación se fue modificando en la medida que la profundización del conocimiento (de índole geológica, geotécnica, ambiental, hidrológica, hidráulica e hidromecánica) reveló renovadas problemáticas o soluciones tecnológicas preferibles.

2015 年开工标志着一个阶段的结束，即根据能源组合和环境问题的变化，结束了对项目进行的多次调整。事实上，随着知识的深化（地质、岩土、环境、水文、水力和水力机械），发现了新的问题或更可取的技术解决方案，因此对投标时规划的项目进行了修改。

En este proceso, se ha optimizado la selección de los niveles característicos de los embalses y el número de turbinas de las centrales: de seis a cinco turbinas Francis en la central NK; de cinco a tres turbinas Kaplan, en la central JC. Ambas variables son relevantes en el contexto del presente informe y atienden a cuestiones ambientales y contractuales.

在此过程中，对水库的特征水位和水电站的水轮机数量进行了优化：NK 电站的混流式水轮机从 6 台减少到 5 台；JC 电站的卡普兰式水轮机从 5 台减少到 3 台。这两个变量都与本报告相关，且涉及环境和合同的问题。

Esta publicación responde a una iniciativa de la Universidad Nacional de La Plata cuyo fin es proveer información del principal propósito de la obra, la generación de energía hidroeléctrica, fundamental para los futuros contratos de abastecimiento de energía al sistema interconectado nacional.

本出版物是拉普拉塔国立大学倡议的成果，旨在提供有关该项目的主要水力发电信息，这对于未来向国家互联系统供应能源的合同至关重要。

En ese sentido, en el presente trabajo se aborda la metodología utilizada para la simulación de la operación de las presas del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz (provincia de Santa Cruz, Argentina) y se presentan los resultados obtenidos. A tal fin, se analizan los modos de operación de las centrales en términos de la potencia generada y los despachos de energía provistos. El análisis abarca también la operación conjunta de ambas centrales frente a diferentes escenarios y el modo en que esta incide en las matrices de operación que vinculan los diagramas de explotación de las turbinas con las condiciones de generación de las presas. Algunos de estos escenarios contemplan el funcionamiento de solo la central de aguas abajo, lo cual es pertinente dado que, a la fecha de la redacción de este informe, su construcción se encuentra en un estadio más avanzado de ejecución.

因此，本文介绍了模拟圣克鲁斯河水电大坝（阿根廷圣克鲁斯省）运行使用的方法，并展示了模拟结果。为此，本文从发电量和能源调度的角度分析了电站的运行模式。分析还包括两个电站在不同情况下的联合运行，以及将水轮机运行图与大坝发电条件联系起来的运行矩阵的影响方式。其中一些方案只考虑了下游电站的运行，这是因为本报告撰写时，下游电站的建设已进入后期阶段。

Por último, este informe corresponde a una serie de publicaciones que abarca diferentes aspectos del río y sus obras, y que proyectan, desde la cabecera, la explotación de las obras, el estudio del llenado y su impacto en el estuario, una mirada integradora, tanto longitudinal como temporal del río, con la finalidad de contribuir a un mejor uso de los recursos naturales de Argentina. La primera de ellas es la ya publicada Crecidas de diseño del río Santa Cruz (2023).

最后，本报告与一系列涉及河流及其工程角度的出版物遥相呼应，他们从河流源头、工程运行、填埋研究及其对河口的影响等方面，对河流进行纵向和横向的综合研究，旨在为更好地利用阿根廷的自然资源。其中第一本是已经出版的《圣克鲁斯河设计洪水》（2023 年）。

# CAPÍTULO 2

## 第二章

### Descripción del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz

#### 圣克鲁斯和水利开发项目的描述

Las presas Presidente Néstor Carlos Kirchner (anteriormente, Condor Cliff; de aquí en más, NK) y Gobernador Jorge Cepernic (anteriormente, La Barrancosa; de aquí en más JC) se encuentran, a la fecha de la edición de esta publicación, en construcción en la provincia de Santa Cruz, en la Patagonia Argentina (Fig. 2.1). Ambas obras, emplazadas sobre el curso del río Santa Cruz, constituyen los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz (Fig. 2.2).

内斯托尔-卡洛斯-基什内尔总统大坝（原 Condor Cliff 大坝，以下简称 NK 大坝）和豪尔赫-塞佩尼克大坝（原 La Barrancosa 大坝，以下简称 JC 大坝）位于阿根廷巴塔哥尼亚的圣克鲁斯省（图 2.1）。这两座大坝都位于圣克鲁斯河上，构成了圣克鲁斯河水电开发项目（图 2.2）。

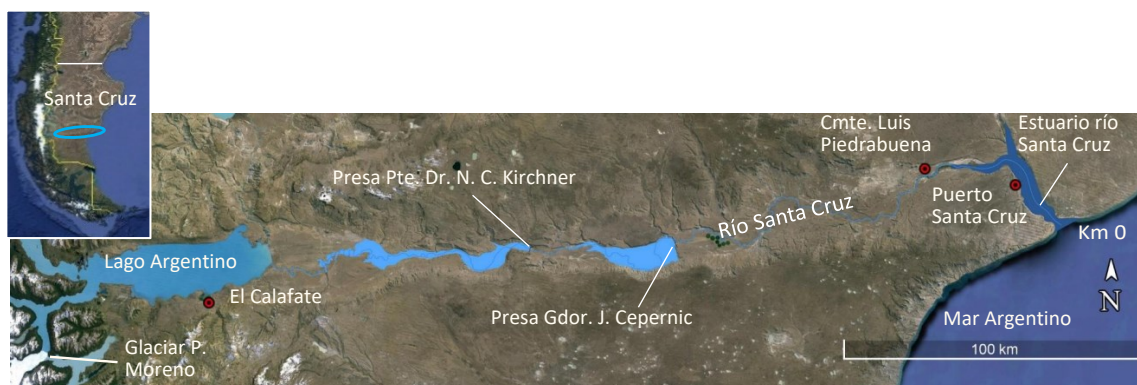


Figura 2.1: Ubicación del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz (presas NK y JC), hidrografía de la zona y localidades aledañas

图 2.1: 圣克鲁斯河水利枢纽工程、内斯托尔·卡洛斯·基什内尔总统电站（孔多克里夫）和豪尔赫·塞佩尼克省长电站（拉巴朗克萨）的位置：平面图（上），剖面图（下）

La presa NK está situada a 127 km del nacimiento del río Santa Cruz, en el lago Argentino (coordenadas 50°12' 45" Sur y 70°47' 1" Oeste). La población más cercana es la ciudad de El Calafate. La obra consiste en una presa de oscilera con pontón de hormigón en el talud de aguas arriba (Condor Cliff) y presa Gobernador Jorge Cepernic (La Barrancosa); vista en planta (superior); perfil longitudinal (inferior).

NK 大坝位于距阿根廷湖出口 127 公里处（坐标为南纬  $50^{\circ}12'45''$ ，西经  $70^{\circ}47'1''$ ）。距离电站现场最近的人口中心为卡拉法特市。总统电站由混凝土面板堆石坝（CFRD）、装配有 5 台混流式机组的发电厂房、泄水底孔和中孔及由闸门进行控制的表孔溢洪道组成（图 2.3）。图 2.4 至 2.6 展示了电站主要结构的典型剖面图。表 2.1 为总统电站的主要特征参数。





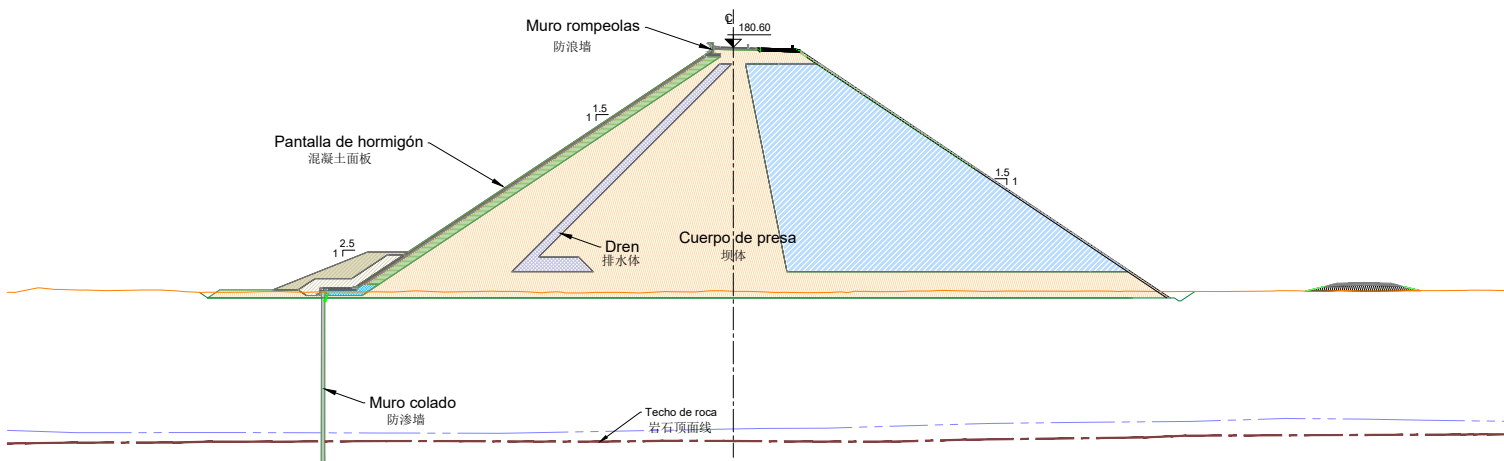


Figura 2.4: Sección transversal de la presa NK

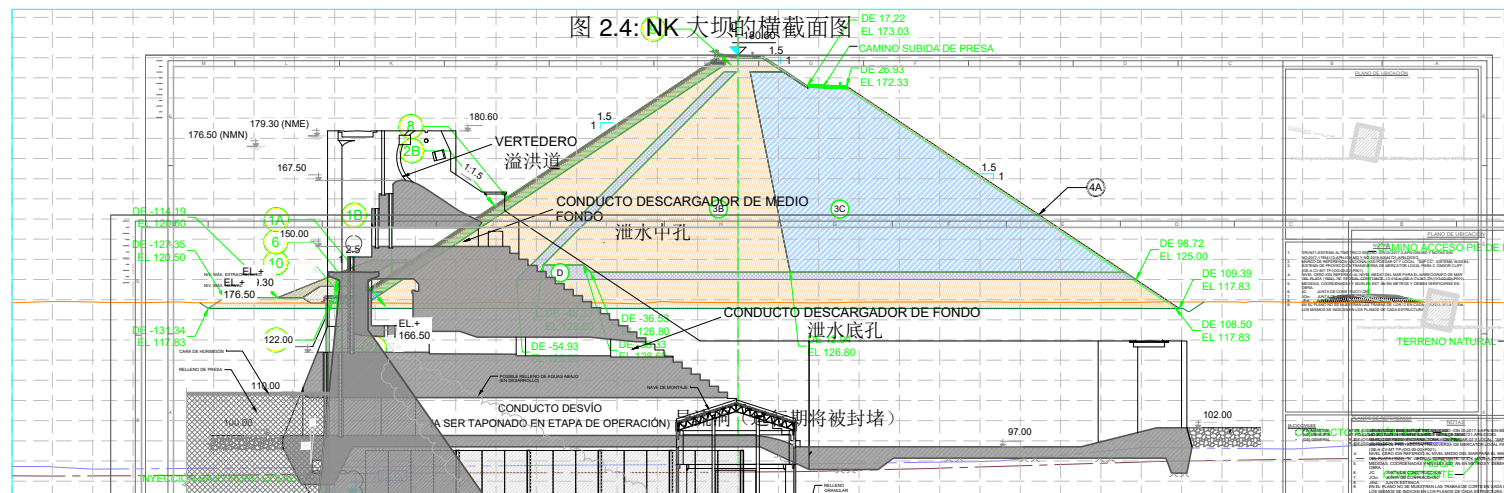


Figura 2.5: Corte transversal de las obras de descarga (vertedero, descargadores de fondo y medio fondo, y desvío) de la presa NK

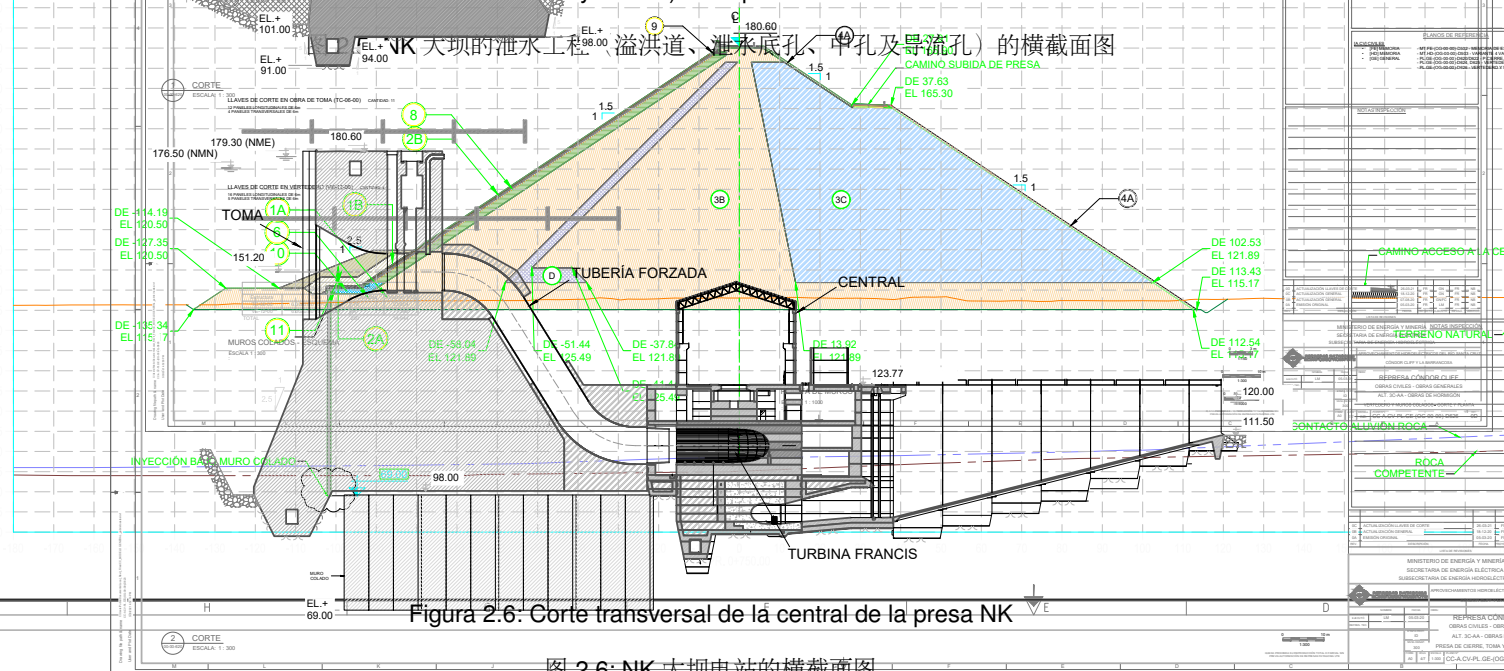


Figura 2.6: Corte transversal de la central de la presa NK

图 2.6: NK 大坝电站的横截面图

A una distancia de 70 km aguas abajo (coordenadas 50°11' 9" Sur y 70°7' 29" Oeste), se emplaza la presa Gdor. Jorge Cepernic (La Barrancosa). La población más cercana es la ciudad



Tabla 2.1: Características principales de la presa NK

表 2.1: NK 大坝的主要特性

Embalse 水库	Caudal medio anual (módulo del río) 年均流量 (以河流为单位)		720 m <sup>3</sup> /s
	Caudal crecida decamilenaria 万年一遇洪峰流量		4160 m <sup>3</sup> /s
	Caudal máximo de crecida registrado 有历史记录的最大洪峰流量		2520 m <sup>3</sup> /s
	Volumen del embalse a nivel máximo normal 最大正常水位下的水库库容		5800 Hm <sup>3</sup>
Presa 大坝	Tipo 类型		CFRD
	Altura máxima 最大高度		71,6 m
	Longitud/ancho 长度/宽度		1850 m/10,95 m
	Cota de coronamiento 坝顶高程		180,6 mIGN
	Cota de parapeto rompeolas 防浪墙高程		181,8 mIGN
	Cota máxima extraordinaria 最大校核洪水位		179,3 mIGN
	Cota máxima normal 最大正常水位		176,5 mIGN
Vertedero 溢洪道	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo) 相对于大坝的位置 (向下游)		Margen izquierda 左岸
	Tipo 类型		Recto 直
	Caudal máximo de diseño 最大设计流量		4160 m <sup>3</sup> /s
	Ancho total 总宽		60 m
	Compuertas 闸门	Cantidad 数量	4
		Tipo 类型	Radial 弧形
		Dimensiones (alto x ancho) 尺寸 (长 x 宽)	9,5 m x 12 m
	Órgano de disipación 消能结构		Cuenco disipador 消力池
Descargador de medio fondo 泄水中孔	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo) 相对于大坝的位置 (向下游)		Margen izquierda 左岸
	Número de conductos 孔数		4
	Órgano de cierre 封堵结构	Cantidad 数量	4
		Tipo 类型	Compuerta plana 平板门
		Dimensiones (alto x ancho) 尺寸 (长 x 宽)	5 m x 4 m
	Caudal máximo unitario 单孔最大流量		350 m <sup>3</sup> /s
	Cota de umbral del conducto 底坎高程		150 mIGN
Descargador de fondo 泄水底孔	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo) 相对于大坝的位置 (向下游)		Margen izquierda 左岸
	Número de conductos 孔数		4
	Órgano de cierre principal 主封堵结构	Cantidad 数量	4
		Tipo 类型	Compuerta radial 弧门
		Dimensiones (alto x ancho) 尺寸 (长 x 宽)	4 m x 3 m
	Órgano de cierre de emergencia 应急封堵结构	Cantidad 数量	4
		Tipo 类型	Compuerta plana 平板门
		Dimensiones (alto x ancho) 尺寸 (长 x 宽)	4 m x 3 m
Central 厂房	Caudal máximo unitario 单孔最大流量		350 m <sup>3</sup> /s
	Cota de umbral del conducto 底坎高程		122 mIGN
	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo) 相对于大坝的位置 (向下游)		Margen izquierda 左岸
	Caracterización de la central 电站类型		Punta 调峰运行
	Cantidad de turbinas 水轮机组数量		5
	Tipo de turbinas 水轮机组类型		Francis
	Caudal nominal turbinado 额定流量		365 m <sup>3</sup> /s
	Caudal máximo de operación 运行最大流量		365 m <sup>3</sup> /s
	Caudal mínimo de operación 运行最小流量		242 m <sup>3</sup> /s
	Salto de diseño 设计水头		57,9 m
	Salto máximo de operación 运行最大水头		61,4 m
	Salto mínimo de operación 运行最小水头		49,6
	Potencia instalada 装机容量		950 MW
	Energía media anual, Escenarios 1, 2 y 3 [GWH] 年均最低发电量 (调峰电站)		3376 - 3403 - 3465
	Velocidad de rotación de turbina 水轮机转速		100 rpm
	Número de álabes del rotor de turbina 水轮机转轮叶片数量		13
	Número de álabes del distribuidor 导水机构叶片数量		24
	Center line del rotor de turbina 水轮机中心线		109 m
	Altura del álabe del distribuidor 导水机构叶片高度		2068 mm
	Diámetro superior (D <sub>1</sub> ) 顶部直径 D <sub>1</sub>		6300 mm
	Diámetro inferior (D <sub>2</sub> ) 底部直径 D <sub>2</sub>		6682 mm
	Órgano de cierre 封堵结构		Compuerta plana 平板门
	Potencia nominal de generadores 发电机额定功率		190 MW

de Comandante Luis Piedrabuena. La obra, también una presa de escollera con pantalla de hormigón en el talud de aguas arriba (CFRD), está equipada con 3 turbinas Kaplan, descargadores de fondo y un aliviadero de superficie regulado por compuertas (Fig. 2.7). Las Fig. 2.8 a Fig. 2.10 muestran las secciones típicas de los principales componentes de la obra. La Tabla 2.2 resume las características del aprovechamiento.

豪尔赫·塞佩尼克省长电站（拉巴朗克萨）位于总统电站下游 70 公里处，坐标为南纬 50°11' 9" 西经 70°7' 29"。距离电站现场最近的人口中心为好石头城市。省长电站由混凝土面板堆石坝（CFRD）、装配有 3 台轴流转桨式机组的发电厂房、泄水底孔及由闸门进行控制的表孔溢洪道组成。图 2.7 为项目总示意图，图 2.8 至 2.10 展示了电站主要结构的典型剖面图。表 2.2 为省长电站的主要特征参数。

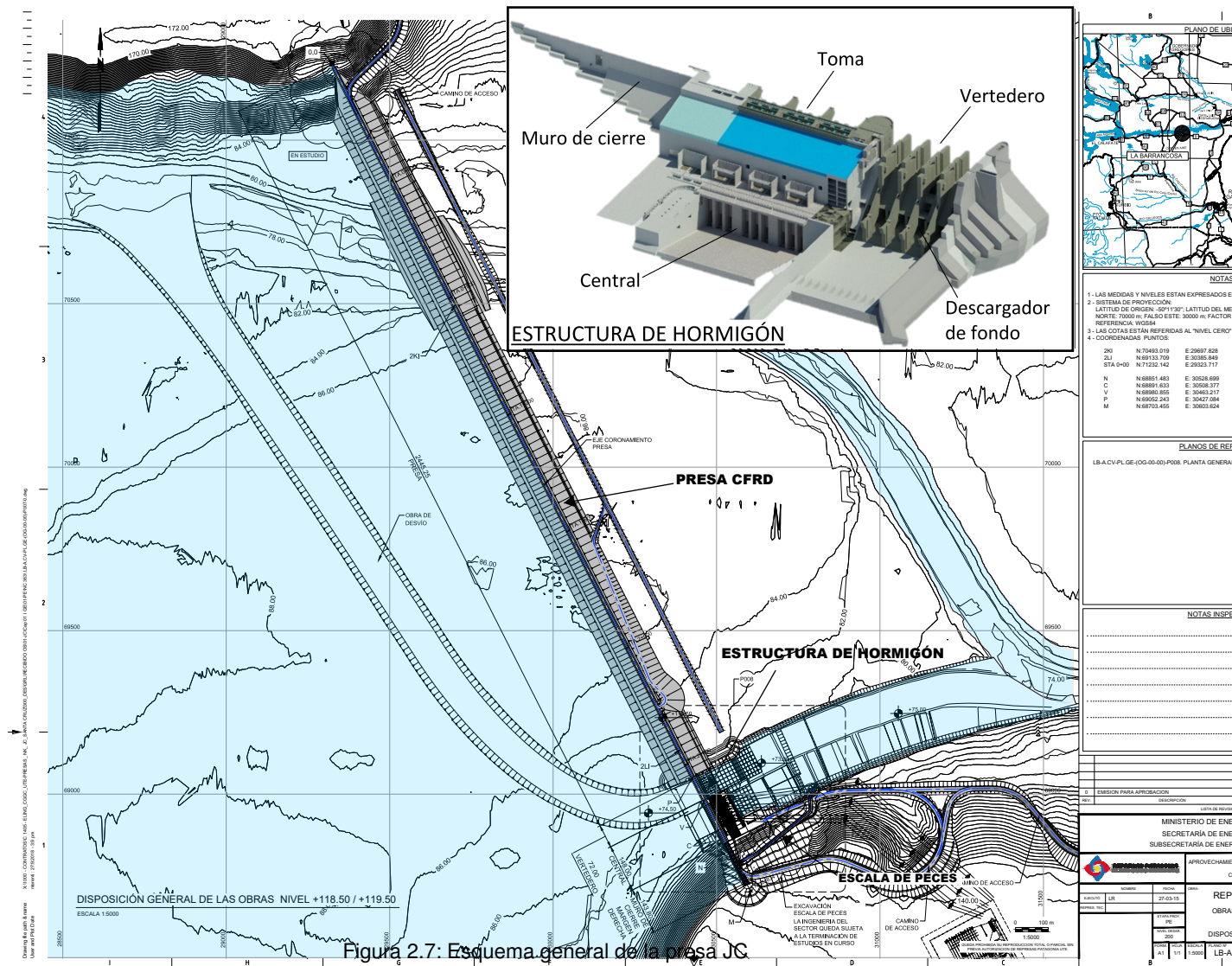


图 2.7: JC 大坝总体示意图

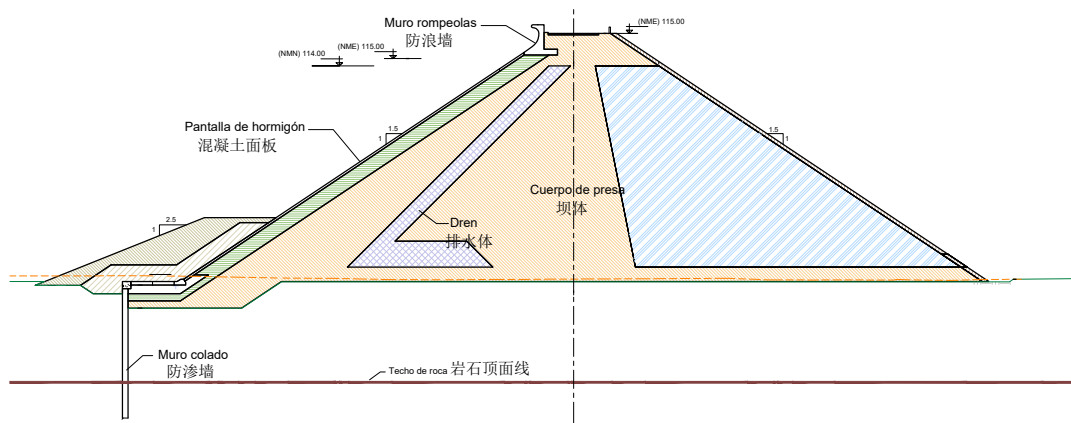


Figura 2.8: Sección transversal de la presa JC

图 2.8: JC 大坝的横截面图

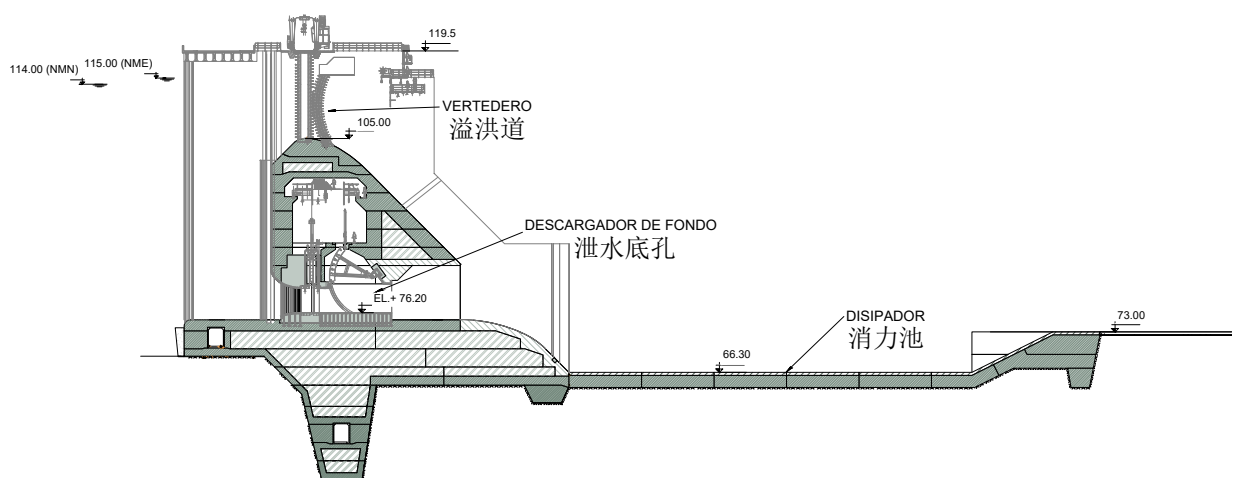


Figura 2.9: Corte transversal de las obras de descarga (vertedero, descargadores de fondo y medio fondo, y desvío) de la presa JC

图 2.9: 泄水结构典型详图 (溢洪道和泄水底孔) - 省长电站

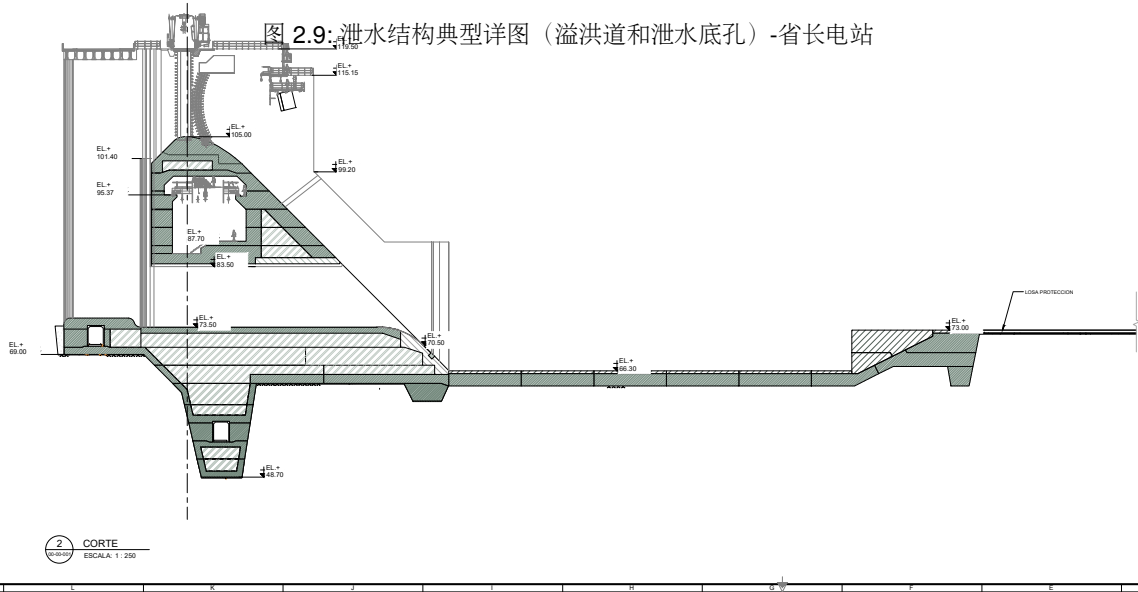




Tabla 2.2: Características principales de la presa JC

表 2.2: JC 大坝的主要特性

Embalse 水库	Caudal medio anual (módulo del río) 年均流量 (以河流为单位)		720 m³/s
	Caudal crecida decamilenaria 万年一遇洪峰流量		4160 m³/s
	Caudal máximo de crecida registrado 有历史记录的最大洪峰流量		2520 m³/s
	Volumen del embalse a nivel máximo normal 最大正常水位下的水库库容		3000 Hm³
Presa 大坝	Tipo 类型		CFRD
	Altura máxima 最大高度		45,5 m
	Longitud/ancho 长度/宽度		2440 m/9,20 m
	Cota de coronamiento 坝顶高程		118,5 mIGN
	Cota de parapeto rompeolas 防浪墙高程		119,7 mIGN
	Cota máxima extraordinaria 最大校核洪水位		115,0 mIGN
	Cota máxima normal 最大正常水位		114,0 mIGN
Vertedero 溢洪道	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo) 相对于大坝的位置 (向下游)		Margen derecha 右岸
	Tipo 类型		Recto 直
	Caudal máximo de diseño 最大设计流量		4160 m³/s
	Ancho total 总宽		72 m
	Compuertas 闸门	Cantidad 数量	6
		Tipo 类型	Radial 弧形
		Dimensiones (alto x ancho) 尺寸 (长 x 宽)	10,62 m x 12 m
Descargador de fondo 泄水底孔	Órgano de disipación 消能结构		Cuenca disipador 消力池
	Cota de cresta 堰顶高程		105,0 mIGN
	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo) 相对于大坝的位置 (向下游)		Margen derecha 右岸
	Número de conductos 孔数		4
	Órgano de cierre principal 主封堵结构	Cantidad 数量	4
		Tipo 类型	Compuerta radial 弧门
		Dimensiones (alto x ancho) 尺寸 (长 x 宽)	4 m x 3 m
	Órgano de cierre de emergencia 应急封堵结构	Cantidad 数量	4
		Tipo 类型	Compuerta plana 平板门
		Dimensiones (alto x ancho) 尺寸 (长 x 宽)	4 m x 3 m
Central 厂房	Caudal máximo unitario 单孔最大流量		296 m³/s
	Cota de umbral del conducto 底坎高程		76,2 mIGN
	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo) 相对于大坝的位置 (向下游)		Margen izquierda 左岸
	Caracterización de la central 电站类型		Base 基荷运行
	Cantidad de turbinas 水轮机组数量		3
	Tipo de turbinas 水轮机组类型		Kaplan
	Caudal nominal turbinado 额定流量		382 m³/s
	Caudal máximo de operación 运行最大流量		394 m³/s
	Caudal mínimo de operación 运行最小流量		133 m³/s
	Salto de diseño 设计水头		34,4 m
	Salto máximo de operación 运行最大水头		36 m
	Salto mínimo de operación 运行最小水头		33,3
	Potencia instalada 装机容量		360 MW
	Energía media anual 年均最低发电量 (调峰电站)		1961 GWH
	Velocidad de rotación de turbina 水轮机转速		107,1 rpm
	Número de álabes del rotor de turbina 水轮机转轮叶片数量		6
	Número de álabes del distribuidor 导水机构叶片数量		24
	Center line del rotor de turbina 水轮机中心线		69,3 m
	Altura del álabe del distribuidor 导水机构叶片高度		2625 mm
	Diámetro del rodete 转轮直径		7000 mm
	Órgano de cierre 封堵结构		Compuerta plana 平板门
	Potencia nominal de generadores 发电机额定功率		120 MW

# CAPÍTULO 3

## 第三章

### Modelo de simulación de embalse

### 水库模拟模型

#### 3.1. Conceptos generales de la modelación de embalses

##### 水库建模的基本概念

En el núcleo de la metodología de cálculo se encuentra el principio de conservación de la masa, cuya expresión matemática se conoce como ecuación de continuidad. Adoptando al embalse como el volumen de control al cual se aplica, este principio permite calcular sus variaciones, en periodos dados de tiempo, asociadas a las permanentes diferencias entre los caudales ingresantes (preponderantemente, los naturales que aporta el río intervenido) y los egresantes (sobre todo, los erogados aguas abajo en respuesta a las consignas de operación preestablecidas).

计算方法的核心是质量守恒原理，其数学表达式也被称为连续性方程。将水库作为控制量，利用这一原理可以计算出水库在特定时间段内的变化，这些变化与流入量（主要是相关河流提供的自然流量）和流出量（主要是根据预先设定的操作指令，向下游释放的流量）之间的永久性差异有关。

El embalse propiamente dicho comprende un cierto volumen de agua. En virtud de las diferencias entre caudales ingresantes y egresantes, este volumen puede fluctuar entre un mínimo y un máximo. La magnitud de esta variación es lo que se conoce como volumen de regulación o capacidad reguladora del embalse. Este volumen bien puede ser insignificante en términos del almacenamiento de agua (es el caso de las centrales sin regulación); el volumen total, sin embargo, es significativo en términos de almacenamiento de energía potencial, lo cual es relevante con miras a la generación hidroeléctrica.

水库本身有一定的水量。由于流入量和流出量的不同，水量会在最小值和最大值之间波动。这种变化的幅度被称为水库的调节库容或调节能力。就蓄水量而言，这个容积可以忽略不计（无调节能力的水电站就是这样）；但就潜在的蓄能而言，总容积却很重要，因为这与水力发电息息相关。

Los modelos de simulación de operación de un embalse son algoritmos matemáticos en los que se conjugan, además, ciertas consignas operativas que deben contemplar las restricciones

de diferente origen (social; económico; ecológico; topográfico, principalmente los niveles característicos del embalse; hidromecánico, etcétera) que pesan sobre un volumen de agua. Estas limitaciones incluyen:

水库的运行模拟模型是一种数学算法，其中还结合了某些运行指令，需要从不同角度（社会、经济、生态、地形，主要是水库的特征水位、水力机械等）考虑这些运行指令对水量的限制。这些限制因素包括：

- la geometría del valle de inundación (la relación entre el nivel y el volumen del embalse);  
洪谷的几何形状（水库水位与库容之间的关系）；
- el régimen hidrológico del río que, en términos de series temporales, permite extraer leyes estadísticas sobre cuyas bases inferir el comportamiento futuro ya sea en el largo plazo, crucial en la evaluación económica del proyecto en su conjunto; sea en el corto plazo, relevante para la proyección de la operación de la central con días u horas de anticipación;  
河流的水文状况，根据时间序列可以提取出统计规律，在此基础上，可以推断出未来的长期趋势，这对整个项目的经济性评估至关重要；或者是短期趋势，这有助于提前几天或几小时预测发电厂的运行情况；
- la meteorología: el régimen de precipitaciones, desde luego, pero también las condiciones de temperatura, viento y radiación, que inciden sobre la tasa de evaporación, cuya contribución al balance puede adquirir proporciones considerables en función de la extensión del espejo de agua del volumen embalsado;  
气象：包括降水量，但也包括温度、风力和辐射条件，这些因素会影响蒸发率，而且水库容量和水量的多少，对平衡的影响非常大；
- el propio diseño del aprovechamiento hídrico: la definición de los niveles máximos, mínimos y extraordinarios.  
水利工程本身的设计：确定最高、最低和超常水位。

Dada su dimensión, cada aprovechamiento hídrico tiene su propio y único diseño y, consecuentemente, su propio conjunto de problemáticas específicas de índoles geológica, geotécnica, climática, estructural, socioambiental y económica, entre otras, con sus respectivas evoluciones temporales. Los modelos de simulación de embalses, entonces, deben ser capaces de articular las especificidades locales propias de cada proyecto con la cualidad universal del principio de conservación de la masa.

考虑到其规模，每个水利开发项目都有其独特的设计，因此也有其特定的地质、岩土、气候、结构、社会环境、经济及其各自的时间演变等一系列问题。因此，水库模拟模型必须能够将每个项目的自身特点与质量守恒原理的普遍性结合起来。

## 3.2. Datos básicos

### 基础数据

El planteo del modelo de simulación de operación del embalse con consignas de despacho de potencia y energía requiere de los siguientes datos fundamentales:

水库运行模拟模型的电力和能源调度需要以下基本数据：

- Vinculados al recurso hídrico en estudio:

与所研究的水资源相关：

- Serie hidrológica del río:  $Q_{hid}(t)$ ;  
河流水文系列： $Q_{hid}(t)$ ;
- Registros de precipitación y de evaporación en la zona del embalse:  $Prec(t)$ ,  $Evap(t)$ ;  
水库区域的降水和蒸发记录： $Prec(t)$ ,  $Evap(t)$ ;
- Ley de nivel versus caudal en una sección de aguas abajo de la central:  $N_{rest}(Q_s)$ .  
厂房下游的水位与流量定律： $N_{rest}(Q_s)$ 。

- Vinculados a las condiciones topográficas:

与地形条件相关：

- Ley de volumen versus nivel de embalse:  $V(N_{emb})$ ;  
体积定律与水库水位的关系： $V(N_{emb})$ ;
- Ley de área versus nivel de embalse:  $\Omega(N_{emb})$ .  
面积定律与水库水位的关系： $\Omega(N_{emb})$ 。

- Vinculados a las características de las turbinas:

与水轮机的特性相关：

- Potencia instalada de la central (máxima potencia mecánica o eléctrica):  $P_{inst}$ ;  
装机功率（最大机械或电力功率）： $P_{inst}$ ;
- Rendimiento ponderado del complejo turbina-generator:  $\eta_T$ ;  
水轮机-发电机组的加权效率： $\eta_T$ ;
- Número de turbinas instaladas:  $n_{turb}$ ;  
安装的水轮机数量： $n_{turb}$ ;
- Diagramas de explotación de las turbinas. Sin embargo, puede que esta información no esté disponible en las etapas previas al proyecto ejecutivo, en cuyo caso, se estima un rendimiento ponderado.  
水轮机运行图。但是，在项目执行的前期阶段可能无法获得这些信息。在这种情况下，将对加权性能进行估算。



### 3.2.1. Régimen hidrológico del río

#### 河流的水文特征

El régimen del río es el insumo principal de un embalse y determina en gran medida su gestión y su funcionamiento. Refiere a la variabilidad temporal (sobre todo, estacional y anual) de los caudales de agua que fluyen hacia el embalse desde la cuenca que lo alimenta. Comprender y gestionar adecuadamente este régimen es esencial para garantizar la eficacia de un embalse en múltiples aspectos. En efecto, el régimen del río determina la disponibilidad de agua en el embalse, lo que impacta directamente en su capacidad para abastecer agua para uso doméstico, agrícola, industrial y generación de energía eléctrica (por no mencionar usos como la prevención de inundaciones aguas abajo). Comprender cabalmente el régimen del río es tanto más posible cuanto más extensa sea la serie hidrológica disponible, y adaptarse a él es esencial para optimizar la utilidad y la sostenibilidad de un embalse en el suministro de agua y la gestión de recursos hídricos.

河流的水系是一个水库的主要输入水源，在很大程度上决定着水库的管理和运行。它指的是从河流流域汇入水库的水量，在时间上（主要是季节性和年度性）的变化。了解并妥善处理河流的水文特征，对于确保水库在诸多方面的有效性至关重要。事实上，河流水文特征决定了水库的可用水量，直接影响到水库为日常生活、农业、工业和发电（对下游的防洪等用途更是如此）供水的能力。水文序列越长，就越有可能对河流的水系有更透彻的了解。调整并适应河流水系，对于优化水库在供水和水资源管理方面的效用和可持续性至关重要。

Por definición, el módulo del río viene dado por la expresión:

河流的模型可以表示为：

$$Q_{mod} = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt \quad (3.1)$$

Donde  $T$  representa la longitud de la serie hidrológica disponible.

其中， $T$  代表现有水文序列的长度。

Usualmente, una serie hidrológica se presenta como una sucesión de registros de caudales medios diarios o mensuales (Fig. 3.1). En tal caso, la expresión integral (Ec. 3.1) es sustituida por una sumatoria de términos discretos:

通常，水文序列代表的是连续日或月的平均流量记录（图 3.1）。在这种情况下，积分表达式（公式 3.1）可以被取代为离散项的求和：

$$Q_{mod} = \frac{1}{T} \sum Q_i \Delta t$$

En la cual, cada uno de los términos involucrados corresponde a una partición,  $\Delta t$ , del periodo  $T$ .

其中，涉及的每个项都对应于周期  $T$  的一个分区  $\Delta t$ 。

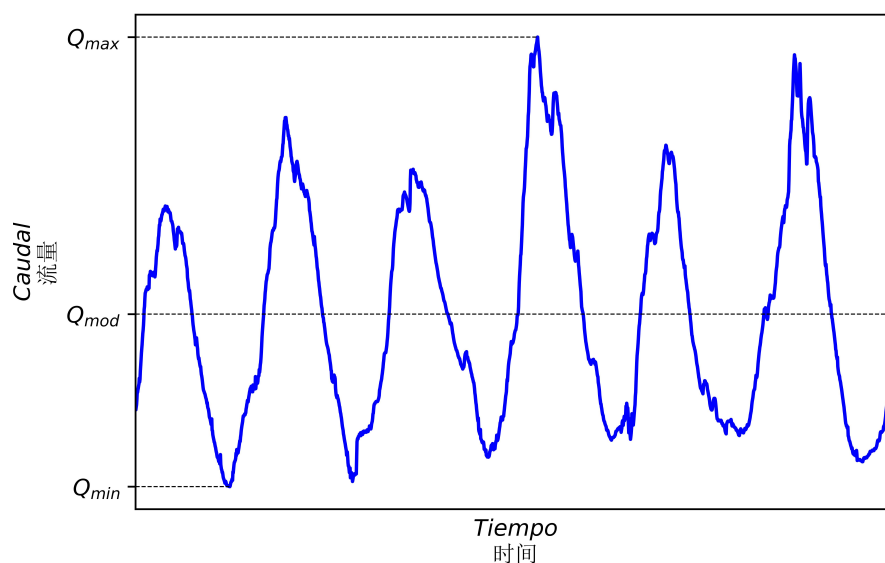


Figura 3.1: Serie hidrológica y caudales característicos

图 3.1: 水文序列和特征流量

En el caso del río Santa Cruz, la serie hidrológica se conforma de caudales medios diarios. El caudal módulo es de  $720 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tabla 2.1).

就圣克鲁斯河而言，水文序列由日均流量组成。模拟流量为  $720 \text{ 立方米/秒}$ （表 2.1）

Una magnitud relevante del río es el derrame anual, que designa al volumen que provee este durante un año hidrológico y viene dado por:

河流的一个相关量级是年径流量，它表示河流在一个水文年中提供的水量，其计算公式为：

$$V_{\text{anual}} = Q_{\text{mod}} T_a$$

Donde  $T_a$  es la duración de un año.

其中， $T_a$  是指一年的时间。

### 3.2.2. Dimensiones de los embalses y la regulación hidrológica

#### 水库规模与水文调节

Los embalses pueden distinguirse según tengan o no capacidad de regulación (usualmente almacenando agua durante periodos húmedos para liberarla durante los más secos) de tal manera de compatibilizar la serie hidrológica del curso de agua intervenido con los objetivos operativos de la obra hidráulica. La regulación, por su parte, puede ser estacional o interanual y ello depende, en buena medida, de las dimensiones del embalse. Estas guardan relación con la natural regu-

laridad del curso de agua: los ríos de régimen pluvial exhiben mayor variabilidad tanto estacional como interanualmente; los de regímenes glacial y nival, en cambio, tienen ciclos interanuales y estacionales, respectivamente, más predecibles.

可以根据水库是否具有调节能力（通常是在雨季蓄水，旱季放水）来区分水库，以便使相关水道的水文序列与水利工程的运行目标相一致。调节可以是季节性的，也可以是跨年度的，这在很大程度上取决于水库的规模。这些都与水道的自然规律有关：雨水灌溉的河流表现出更大的季节和年际变化，而冰川和雪水灌溉的河流，其年际周期和季节周期的可预测性相对较强。

En los embalses con regulación, el volumen almacenable físicamente disponible,  $V_r$  (Fig. 3.2), es el prisma contenido por el terreno natural y los dos planos horizontales que se elevan a las alturas de los niveles mínimo y máximo normales. La relación entre este volumen y el derrame anual del río es un índice del grado de regulación,  $R$ , al que el embalse puede contribuir (Ec. 3.2).

在调节型水库中，实际可用的可蓄水量  $V_r$ （图 3.2）是由自然地形和上升到正常情况下的，最低和最高水位高度的两个水平面，所构成的棱柱体。该库容与河流年径流量的比值是水库的调节程度  $R$ （公式 3.2）。

$$R = \frac{V_r}{V_{anual}} \quad (3.2)$$

A título ilustrativo, se puede estimar que, si  $R$  es de hasta 3 %, el embalse puede considerarse sin capacidad de regulación; valores del orden del 20 %, en cambio, son compatibles con una capacidad de regulación anual; y valores en el orden del 40 % al 50 %, con una capacidad de regulación interanual.

举例说明，如果  $R$  值不超过 3 %，可以认为水库没有调节能力；如果  $R$  值在 20 % 左右，则具有年度调节能力；如果  $R$  值在 40 % 至 50 % 之间，则具有跨年度调节能力。

### 3.2.3. Definición de los niveles operativos

#### 运行水位的确定

Las consignas operativas de los aprovechamientos hidroeléctricos incluyen la observancia de ciertas restricciones al movimiento del embalse. Estas se materializan en, de mínima, los niveles mínimo normal ( $NMiN$ ) y máximo normal ( $NMaN$ ) (Fig. 3.2).

水力发电站的运行规程包括对水库移动的特定限制。这些限制应当至少包含：最低正常水位 ( $NMiN$ ) 和最高正常水位 ( $NMaN$ )（图 3.2）。

Mientras que el nivel máximo normal está vinculado a la altura de la obra y a consideraciones medioambientales que conciernen a la amplitud del área inundada, el nivel mínimo normal responde a factores tales como la sumergencia de la sección de las turbinas, el rango de saltos operativos de estas y la optimización de la energía 'firme' (o 'primaria', es decir, aquella que puede despacharse con una garantía del 100 %) frente a la total del aprovechamiento (véase Sección

### 3.2.4).

最高正常水位与施工现场的高度和洪水淹没范围的环境因素有关，而最低正常水位则与水轮机自身的淹没程度、水轮机的运行水头范围以及“稳定”能量（即可以保证 100 % 调度的“一次”能量）的优化等因素有关（见第 3.2.4 节）。

La sumergencia,  $S$ , que depende de la energía cinética del escurrimiento en la sección de la toma y de la altura en que esta se encuentra, debe respetar un límite inferior,  $S_{min}$ , pues, de otro modo, es posible el ingreso de aire a la conducción de las turbinas por formación de vórtices, lo cual es inadmisibile. O sea,  $S > S_{min}$ .

淹没度  $S$  取决于进气口径流的动能及其所处的高度，必须遵守一个下限， $S_{min}$ ，否则，空气有可能因形成涡流而进入水轮机管道，这是不能接受的。换句话说，要满足  $S > S_{min}$ 。

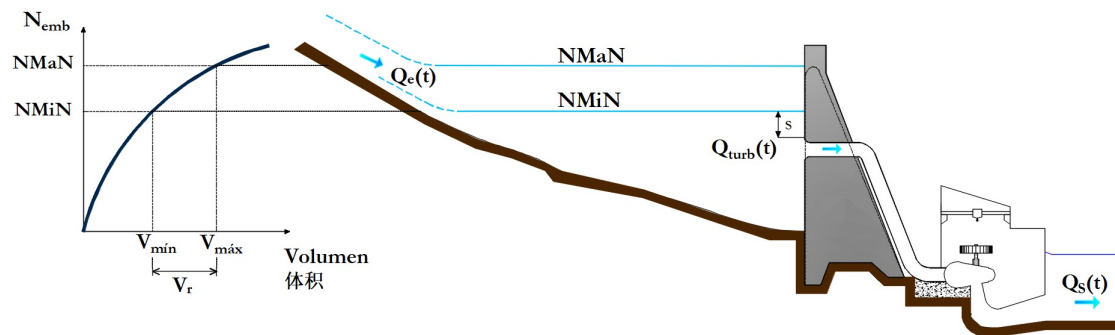


Figura 3.2: Esquema general de una presa con el detalle de sus niveles operativos

图 3.2: 大坝总体示意图及其运行水位详图

El rango de saltos operativos de las turbinas, por su parte, está determinado por los ensayos sobre modelos físicos.

水轮机的运行水头范围则是通过物理模型试验确定的。

El descenso del nivel mínimo normal redunda en un incremento del volumen de regulación, lo cual permite aumentar la energía firme. Sin embargo, simultáneamente, admite con mayor frecuencia condiciones de operación con menor energía de posición disponible, en detrimento de la energía total. Estas dos tendencias antagónicas se traducen en la existencia de un máximo local de energía firme, en coincidencia con la posición óptima del nivel mínimo normal.

正常最低水位的降低会导致调节水量的增加，从而提高稳定能量。但与此同时，这也更大程度地，让其在现有位置，用较低的能量运行，从而损失了总能量。这两种对立的趋势，导致稳定能量存在局部最大值，它对应正常最低水位的最佳位置。

La definición de los límites impuestos por los niveles operativos, junto con las singularidades topográficas del volumen de embalse (las curvas características nivel-volumen y nivel-área), dotan de un carácter material a la formulación abstracta del principio de conservación de la masa y configuran el modelo específico del aprovechamiento en cuestión.

确定运行水位所造成的限制，连同水库库容的地形特殊性（水位-库容和水位-面积特性曲线），使

质量守恒原理的抽象表述具有了物质特性，并形成了有关水利开发的具体模型。

Por lo usual, si el fin del embalse es la generación de energía, estos niveles permanecen constantes en el tiempo; sin embargo, es posible que admitan variaciones estacionales (sobre todo el nivel mínimo normal) en caso de cumplir con propósitos adicionales o de mediar situaciones extraordinarias.

通常情况下，如果水库的目的是发电，这些水位会长期保持不变；但是，如果有其他目的，或特殊情况，这些水位可能会出现季节性变化（尤其是正常最低水位）。

La identificación de los niveles máximo y mínimo normales permite, en última instancia, evaluar la generación primaria y secundaria (definida por oposición a ella, véase Sección 3.2.4) del aprovechamiento y sus periodos de déficit y, al mismo tiempo, crear distintos escenarios de despacho de energía o de potencia (como una función del tiempo).

确定正常最高和最低水位后，就可以评估一次和二次发电量（相关定义见第 3.2.4 节）的利用率及其亏损期，同时还可以创建不同的能源或电力调度方案（如时间函数）。

### 3.2.4. Conceptos de potencia y energía

#### 功率与能源的概念

La potencia eléctrica generada por una central hidroeléctrica en un instante dado,  $t$ , de su operación está dada por la Ec. 3.3.

一个水电站在给定的运行时间  $t$  的所产生的发电量，由公式 3.3 得出。

$$P_{gen}(t) = \eta_T(t) \gamma H_u(t) Q_{turb}(t) \quad (3.3)$$

Donde  $\gamma$  representa el peso específico del agua, y  $H_u(t)$  y  $Q_{turb}(t)$ , el salto útil y el caudal turbinado correspondientes al instante en cuestión, respectivamente. El rendimiento,  $\eta_T(t)$ , que es función de los anteriores, engloba la eficiencia de las transformaciones energéticas de la turbina ( $\eta_h$ ), los cojinetes ( $\eta_m$ ) y el generador ( $\eta_e$ ) bajo tales condiciones operativas.

其中， $\gamma$  表示水的比重， $H_u(t)$  和  $Q_{turb}(t)$  分别表示相关瞬时的有用水头和涡轮流量。效率  $\eta_T(t)$  是上述参数的函数，其中包含水轮机 ( $\eta_h$ )、轴承 ( $\eta_m$ ) 和发电机 ( $\eta_e$ )，在这种运行条件下的能量转换效率。

La energía media anual ( $EMA$ , una variable significativa en la evaluación económica del proyecto hidroeléctrico) resulta de integrar la potencia generada a lo largo de un año representativo:

年平均能量（ $EMA$ ，水电项目中经济性评估的一个重要变量）是将一个有代表性年份的发电量，综合计算得出的结果：

$$EMA = \int^{T_a} P_{gen}(t) dt$$

De contar con una serie hidrológica de varios años de longitud, la energía media anual se evalúa como el promedio de la energía generada entre tal cantidad de años (Ec. 3.4).

如果有很多年的水文序列，则年平均能量可按这些年份中，所产生能量的平均值进行评估（公式 3.4）。

$$EMA = \frac{1}{N_t} \sum P_{gen_i} \Delta t \quad (3.4)$$

Donde  $P_{gen_i} \Delta t$  representa la energía generada durante un intervalo  $\Delta t$  genérico y  $N_t$  en el número de años de la serie.

其中， $P_{gen_i} \Delta t$  表示一般  $\Delta t$  时间间隔内产生的能量， $N_t$  表示序列中的年份数。

En la escala diaria, la capacidad de la central de despachar una cierta cantidad de energía está limitada por la potencia instalada en ella. El concepto de garantía se vincula a esta capacidad. La energía firme equivale al producto de la potencia instalada por el tiempo de generación,  $E_F = P_{inst} \Delta T_F$ . Por contraposición, la energía generada en exceso de la firme se da en llamar ‘secundaria’ y puede ser tan grande como  $P_{inst} (24 - \Delta T_F)$  (Fig. 3.3) los días en que la central genera su máxima energía diaria posible. La energía total generada,  $E_T$ , es la suma de la energía firme y la secundaria,  $E_F + E_S$  (Fig. 3.3).

以‘日’为单位，水电站对一定量电能的调度能力取决于其装机容量。保障的概念与这一调度能力相关。稳定的能量等于装机容量与发电时间的乘积，即  $E_F = P_{inst} \Delta T_F$ 。与此相反，超出固定发电量的电能称为‘二次’电能，在电站日发电量达到最大值的情况下，二次电能可达到  $P_{inst} (24 - \Delta T_F)$ （图 3.3）。总发电量  $E_T$  是固定发电量和二次发电量  $E_F + E_S$  的总和（图 3.3）。

Cuando el caudal disponible excede el necesario para la máxima capacidad de generación diaria de la central, la diferencia se evacúa (y su potencia hidráulica,  $P_{vert} = \gamma H_u Q_{vert}$ , se disipa) a través de los órganos dispuestos para tal fin, que usualmente incluyen un cuenco disipador. La energía no aprovechada en un día semejante sería  $E_{vert} = P_{vert} 24$  (Fig. 3.4).

当可用流量超过电站日最大发电量的需求时，差额部分将通过为此目的设置的装置进行消除（通常包括消力池，并消散其水力  $P_{vert} = \gamma H_u Q_{vert}$ 。这样的话一天未使用的能量为  $E_{vert} = P_{vert} 24$ （图 3.4）。

Por el contrario, en periodos de merma estacional del caudal, es posible que el volumen de agua almacenado en el embalse sea insuficiente para la generación diaria de energía firme en una proporción  $E_{FF} = P_{inst} \Delta T_{FF}$ . Se dice entonces que la central ‘entra en falla’ (Fig. 3.5).

反之，在季节性流量下降时，水库中的蓄水量可能不足以满足日稳定发电量， $E_{FF} = P_{inst} \Delta T_{FF}$ ，这时电站就会‘出现故障’（图 3.5）。

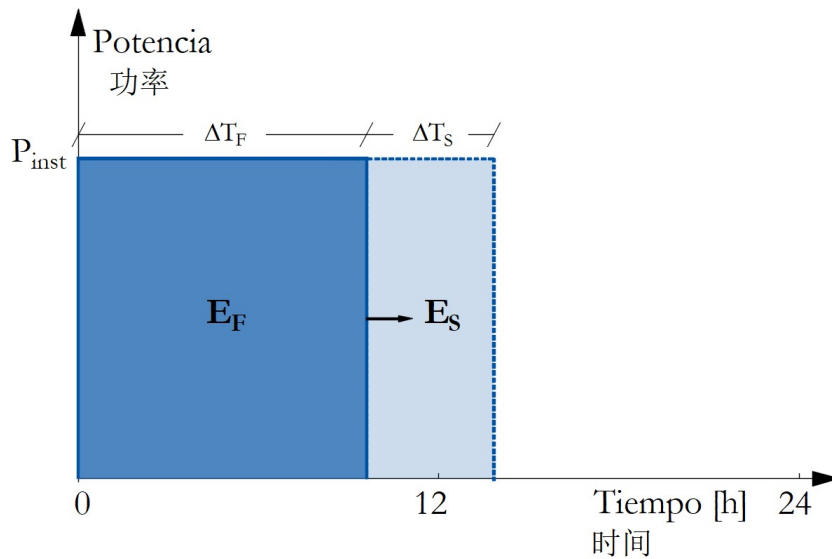


Figura 3.3: Cantidades de energía firme y -ocasionalmente- secundaria generadas durante un día ordinario

图 3.3: 日产生的固定电能与某天偶尔产生的二次电能。

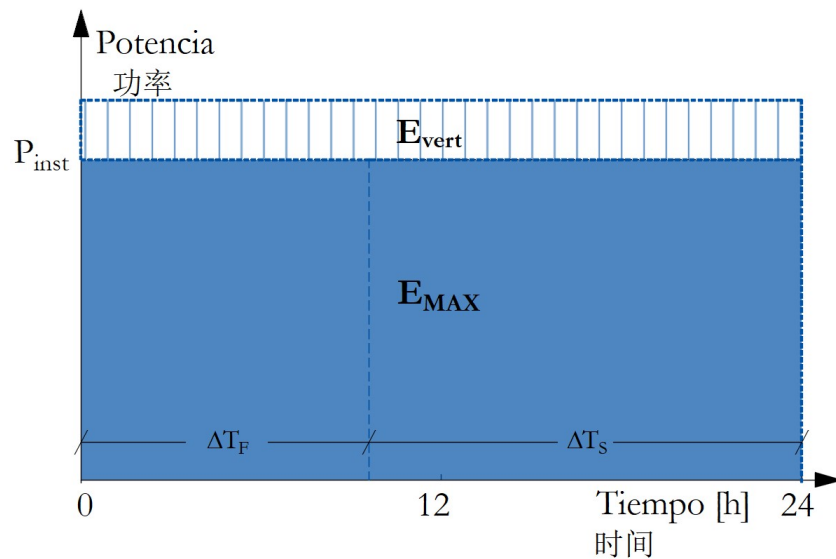


Figura 3.4: Cantidades de energía generada y disipada durante un día en un periodo de excedencia

图 3.4: 一天中不同时段所产生及消除的能量

Los sistemas eléctricos sufren, por sí mismos, fallas durante las cuales las centrales se ven eximidas de generar potencia. En la medida en que la garantía, tal como fue definida previamente, aplica al tiempo en que las centrales pueden suplir esta demanda, el concepto de energía firme cobra una nueva significación. En efecto, si se asume que las fallas eléctricas afectan alrededor de un 3 % de la duración de la vida útil de una central, entonces puede asumirse que esta puede proveer energía firme durante aproximadamente todo el tiempo que le sea demandada en la medida en que la duración de los periodos de falla de generación sea de ese mismo orden.

电力系统自身也会出现故障，在此期间电站不能发电。如果上述所确定的保障时间能够满足这一需求，那么就赋予了稳定电能新的意义。事实上，如果假设电力故障会影响电站约 3% 的寿命，那么可以认为只要故障的持续时间相同，电站就可以提供与需求时间相当的稳定电能。

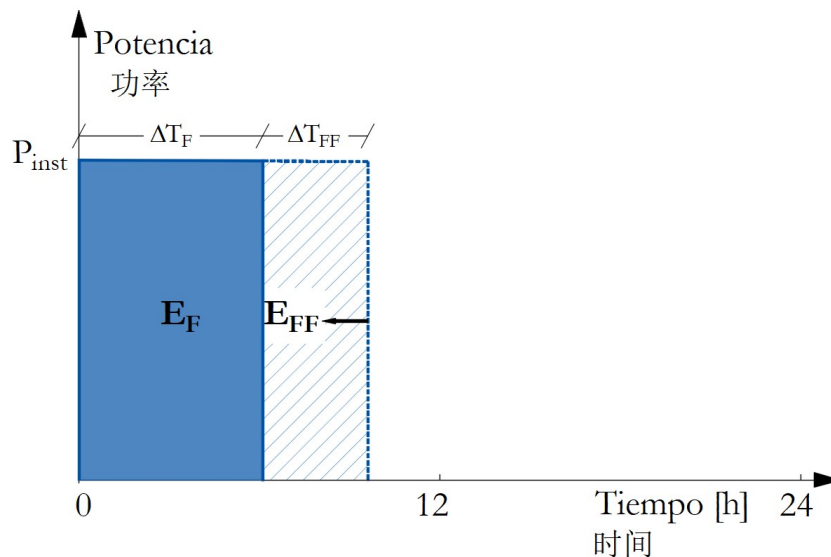


Figura 3.5: Cantidad de energía generada durante un día en un periodo de falla

图 3.5: 一天中故障时段内所产生的能量

A fin de lograr una garantía del orden del 97 % al 100 % del tiempo, es necesario disponer de una capacidad de regulación que al menos compense por los periodos de estiaje que se dan durante un año (regulación estacional).

为了保障 97 % 至 100 % 的时间，必须具备至少能补偿一年中出现的低水位期（季节性调节）的调节能力。

En resumen, los aprovechamientos hidroeléctricos sin regulación pueden cumplir con el despacho de potencia empuntada. Los aprovechamientos con regulación, además, pueden cumplir con la entrega de energía firme (garantías del 97 % al 100 %) asociada a una potencia máxima.

总之，没有调节的水电开发项目可以满足调峰电力的调度。有调节能力的水电开发项目也可以满足与最大装机功率相关的稳定电力输送（97 % 到 100 % 的保障）。

### 3.2.5. Condiciones de operación

#### 运行条件

La generación de potencia comporta sus propias consignas operativas específicas a fin de absorber la demanda del sistema eléctrico, variable en el tiempo con una periodicidad diaria. El modo en que las centrales abastecen la demanda eléctrica permite distinguirlas entre empuntadas (cuyo fin es satisfacer la máxima potencia exigida durante las horas de máxima demanda) o de base (que proveen una potencia constante a lo largo de todo un día).

电站有自身特定的运行指令，以吸收电力系统每天随时间变化的需求。电站提供电力需求的方式可将其区分为调峰（旨在满足高峰时段的最大电力需求）和基础发电（全天提供恒定电能）。

A lo largo de un día, la demanda eléctrica puede variar significativamente. A fin de abastecerla en todo momento, suelen emplearse recursos energéticos de toda índole. En ese sentido, la energía



hidroeléctrica destaca por su capacidad de empuntamiento, o sea, su flexibilidad para adaptarse rápidamente a bruscos cambios de potencia conservando un buen rendimiento sin desmedro de la estabilidad del sistema.

一天之中，电力需求可能会有很大的变化。为了随时供电，通常需要使用各种能源。在这方面，水力发电的突出特点是其调峰能力，即在不影响系统稳定性的情况下，灵活快速地适应功率的突然变化，同时保持良好的性能。

En efecto, una central hidroeléctrica dispone de un determinado número de turbinas que permiten generar la potencia demandada por sucesivos encendidos (o apagados) y cambios de sus respectivos puntos de operación, siguiendo ciertas condiciones del sistema hidroelectromecánico.

实际上，水电站配有一定数量的水轮机，根据水力机电系统的特定条件，通过连续开启（或关闭）以及改变各自的操作点来产生所需的电力。

Sin embargo, la puesta en operación de una turbina requiere de un tiempo mínimo de maniobra que involucra sistemas auxiliares y contempla los tiempos propios del movimiento del agua. Por otra parte, las variaciones bruscas del caudal turbinado se traducen, aguas abajo, en ondas de crecida artificiales indeseables desde el punto de vista hidrológico y ambiental.

然而，水轮机的启动需要用最短的操控时间，这涉及到辅助系统并要考虑到水移动所需的时间。另外，水轮机下游水流的骤变会造成人为的洪水波浪，这从水文和环境的角度来讲，都是不可取的。

Es por esta última razón que, habitualmente, las centrales con capacidad de empuntamiento requieren de embalses compensadores aguas abajo cuyo efecto es el de atenuar las variaciones bruscas de caudal y restituir al río un caudal constante diario.

正是出于最后一个原因，具有调峰能力的水电站通常需要下游补偿水库，其作用是减弱水流量骤变所产生的影响，恢复河流每天恒定的流量。

La consigna principal de las centrales con operación de base, por su lado, consiste en turbinar el caudal proveniente del río en la medida en que esto sea posible. Los caudales en exceso de la capacidad de generación de la central son evacuados a través de un órgano de alivio, usualmente un vertedero o un descargador de fondo. Bajo tales condiciones, el nivel del embalse se mantiene esencialmente fijo. Tal operación es típica de embalses sin capacidad de regulación.

另一方面，基础发电水电站的主要任务是尽可能地将河水流入水轮机中。超过水电站发电能力的水流会通过泄洪洞（通常是溢洪道或底孔）排出。在这种情况下，水库水位基本保持不变。这种运行方式是没有调节能力的水库典型的运行方式。

A diferencia de las centrales empuntadas, la generación de potencia responde menos a las condiciones impuestas por la demanda eléctrica del sistema que a las propias del río intervenido.

与调峰电站相比，发电功率对河流自身条件的依赖程度要高于对系统电力条件的依赖程度。

### 3.2.6. Características de las turbinas

#### 水轮机特点

El rendimiento de las turbinas, en tanto instrumentos de transformación de la energía hidráulica en energía eléctrica, es crucial en el proyecto de las centrales hidroeléctricas. Sin perjuicio de los vertiginosos avances de la fluidodinámica computacional, el rendimiento de las turbinas se evalúa universalmente en ensayos en modelos físicos a escala. Los resultados de estos ensayos se presentan habitualmente en la forma de diagramas colinares, en los que el rendimiento hidráulico,  $\eta_h$ , se presenta como función de parámetros adimensionales, (por ejemplo,  $\psi = gH_u/u^2$  y  $\phi = c_m/u$ , donde  $c_m$  y  $u$  son las componentes meridional y tangencial de la velocidad en el plano de la turbina, respectivamente), o unitarios (por ejemplo,  $N_{11} = ND/H_u$  y  $Q_{11} = Q/(D^2 H_u^{0.5})$ ) (Fig. 3.6).

作为将水能转化为电能的工具，水轮机的效率对水电站的设计至关重要。尽管计算流体动力学的发展日新月异，但水轮机性能的评估仍普遍采用物理比例模型试验。这些测试结果通常以对比图的形式表示，其中水力效率  $\eta_h$  是尺寸参数的函数（如  $\psi = gH_u/u^2$  和  $\phi = c_m/u$ ，其中  $c_m$  和  $u$  分别为水轮机平面内速度的径向分量和切向分量），或单元参数（如  $N_{11} = ND/H_u$  和  $Q_{11} = Q/(D^2 H_u^{0.5})$ ）（图 3.6）。

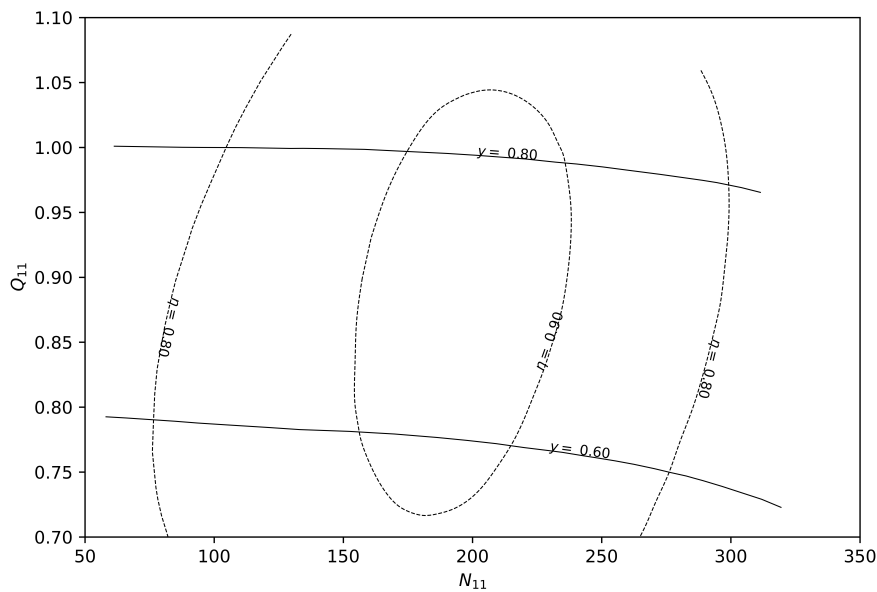


Figura 3.6: Diagrama colinar en términos de  $N_{11}$  y  $Q_{11}$  (extraído de Wylie y Streeter, 1978)

图 3.6:  $N_{11}$  和  $Q_{11}$  对比图（山丘图）（摘自 Wylie 和 Streeter, 1978）

Con la debida corrección por los efectos de escala, estos resultados permiten extrapolar los diagramas de explotación de las turbinas en términos de variables más reconocibles: el caudal a través de la turbina, el salto útil o la potencia generada (véase Sección 4.1.7).

在对阶梯效应进行适当修正后，这些结果可以用更容易识别的变量来推断水轮机的运行图：通过水轮机的流量、有用水头或发电功率（见第 4.1.7 节）。

La bondad de la selección de las turbinas puede mensurarse por el grado de solapamiento de las regiones de mayor rendimiento de sus diagramas de explotación y los puntos de operación previstos del aprovechamiento (tal como sean derivados del modelo de simulación del embalse). En ese sentido, la conceptualización de la interacción entre las variables emanadas del balance hídrico a ambos extremos del embalse bajo consignas de operación dadas, por un lado, y las condiciones operativas de las máquinas que son producto de las combinaciones de aquellas, por el otro, es crucial en el diseño del modelo de simulación.

水轮机选择的优劣可以通过其运行图中效率最高的区域与开发项目预期运行点（由水库模拟模型得出）之间的重叠程度来衡量。从这个意义上讲，在给定的运行限制条件下，水库两端水量平衡变量之间的相互作用，以及这些变量组合所产生的机器运行条件之间的相互作用，对模拟模型的设计至关重要。

El diagrama de explotación, tal como fue introducido, tiene la ventaja indudable de presentar de un modo eminentemente visual la colina de rendimiento de las turbinas en función de un par de variables significativas (salto versus potencia, por ejemplo). A los efectos de la representación matemática, sin embargo, un cambio de variables, tal como el desarrollado por Marchal et al. (1965) y empleado en Wylie y Streeter (1978) para la resolución de fenómenos transitorios inducidos por turbobombas, es preferible. Este cambio de variables requiere de una previa adimensionalización en términos de las magnitudes nominales de las máquinas (denotadas en la Ec. 3.5 por el subíndice  $R$ ):

示意图的优点毋庸置疑，它非常直观地将水轮机的性能曲线呈现为一对重要变量（例如水头与功率）的函数关系。然而，就数学表达而言，变量的变化更为可取，如 Marchal 等人（1965 年）开发的、Wylie 和 Streeter（1978 年）用于解决水轮机泵引起的瞬态现象的变量变化。这种变量变化要求事先根据机器的标称量（在公式 3.5 中用下标  $R$  表示）确定尺寸：

$$h = \frac{H_u}{H_R}, \quad \beta = \frac{T}{T_R}, \quad \nu = \frac{Q_{turb}}{Q_R}, \quad \alpha = \frac{N}{N_R} \quad (3.5)$$

Donde las variables  $T$  y  $N$  representan el torque ejercido sobre el eje de las turbinas y su velocidad de rotación, respectivamente.

其中，变量  $T$  和  $N$  分别代表水轮机轴上的扭矩和转速。

La transformación se completa con un ulterior agrupamiento:

通过进一步结合完成转换：

$$\theta = \arctan\left(\frac{\nu}{\alpha}\right), \quad WH(\theta) = \frac{h}{\alpha^2 + \nu^2}, \quad WB(\theta) = \frac{\beta}{\alpha^2 + \nu^2} \quad (3.6)$$

Operando de esta manera, es posible la representación de los puntos de operación de una turbina desde el espacio  $H_u$  versus  $P$ , por ejemplo, al espacio  $WH$  versus  $\theta$ . Las curvas de referencia, por conveniencia, no son ya las correspondientes a valores constantes de rendimiento, como en

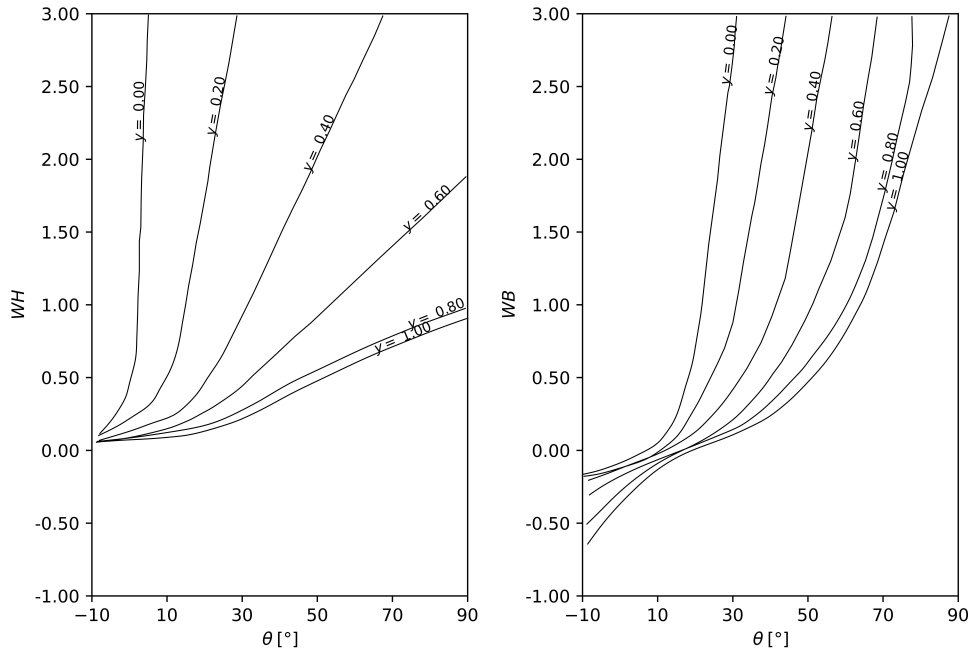


Figura 3.7: Curvas características adimensionales (extraído de Wylie y Streeter, 1978)

图 3.7: 尺寸特点曲线 (摘自 Wylie 和 Streeter, 1978)

un diagrama colinar, sino a valores constantes de la apertura del distribuidor (Fig. 3.7).

通过这种方式，可以将水轮机的运行点表示为从  $H_u$  与  $P$  的空间，如  $WH$  与  $\theta$  的空间。为了方便起见，参考曲线不再是山丘图中效率恒定值对应的曲线，而是导水机构开度恒定值对应的曲线（图 3.7）。

### 3.3. Ecuaciones básicas y esquema numérico de una central con regulación

#### 有调节能力电站的基本公式和数据

La ecuación de continuidad es la expresión de la equivalencia entre el flujo másico neto que atraviesa la superficie que contiene al volumen de control y la tasa de variación de masa contenida dentro de este. Si el volumen de control concierne al del embalse, entonces se obtiene la Ec. 3.7.

连续性方程式表达的是通过控制体积表面的净质量流量与控制体积内质量变化率之间的等价关系。如果控制体积与水库体积有关，则可得到公式 3.7。

$$Q_e(t) - Q_s(t) = \frac{dV}{dt} \quad (3.7)$$

Donde  $Q_e(t)$  y  $Q_s(t)$  son los caudales que absorbe o emana el embalse a un lado y otro de la sección de las turbinas, respectivamente;  $V$  es su volumen; y  $t$ , el tiempo.

其中， $Q_e(t)$  和  $Q_s(t)$  分别为水轮机截面两侧水库吸收或喷出的流量； $V$  为其体积； $t$  为时间。

Discretizando esta ecuación en términos de diferencias finitas y operando, se obtiene:

用有限差分法对该方程进行离散化运算，可以得到:

$$[Q_e(t) - Q_s(t)] \Delta t = \Delta V(t) \quad (3.8)$$

En la medida en que los aprovechamientos hídricos comportan una intervención sobre el ciclo hidrológico, las precipitaciones son la fuente de agua que abastece el embalse, preponderantemente una vez recogida de la cuenca alta a través de los fenómenos de escorrentía y de tránsito a lo largo del cauce del río, pero también de manera directa, sobre la superficie del lago formado. Sobre esta misma superficie opera, con signo antagónico, la evaporación ocasionada por la exposición a las condiciones atmosféricas de radiación y ventosidad. O sea:

水利项目的开发涉及对水文循环的影响，降雨是水库的水源，主要是通过径流和河床转运从上游流域收集的水，但也直接作用于已形成的湖面。在辐射和大风天气等大气条件下，造成的蒸发也同样作用于这一表面，但具有反作用。换句话说:

$$Q_e(t) = Q_{hid}(t) + Q_{prec}(t) - Q_{evap}(t) \quad (3.9)$$

Donde  $Q_{hid}(t)$  es el caudal medio diario del río tal como fuese registrado en la serie hidrológica; y  $Q_{prec}(t)$  y  $Q_{evap}(t)$  representan los caudales medios precipitado y evaporado, respectivamente (Ec. 3.10).

其中， $Q_{hid}(t)$  是水文序列中记录的河流日平均流量； $Q_{prec}(t)$  和  $Q_{evap}(t)$  分别代表平均降水量和蒸发量（公式 3.10）。

$$Q_{prec}(t) = \frac{Prec(t) \Omega}{\Delta t}, \quad Q_{evap}(t) = \frac{Evap(t) \Omega}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Donde  $Prec(t)$  y  $Evap(t)$  representan la precipitación y la evaporación diarias, expresadas en unidad de longitud (habitualmente, en mm); y  $\Omega$ , la superficie del lago de inundación.

其中， $Prec(t)$  和  $Evap(t)$ （通常以毫米为单位）表示的日降水量和蒸发量； $\Omega$  表示洪湖的面积。

El caudal saliente,  $Q_s(t)$ , resulta de la combinación de aquellos que no son retenidos por el embalse por razones funcionales o meramente físicas, a saber, el caudal turbinado,  $Q_{turb}(t)$ ; y el caudal evacuado por el vertedero,  $Q_{vert}(t)$  (Ec. 3.11).

流出量  $Q_s(t)$ ，是由于功能性原因或纯粹的物理原因而未被水库截留的水量，即水轮机流量  $Q_{turb}(t)$  和溢洪道排出的流量  $Q_{vert}(t)$  的综合结果（公式 3.11）。

$$Q_s(t) = Q_{turb}(t) + Q_{vert}(t) \quad (3.11)$$

El caudal turbinado debe satisfacer una consigna de potencia (en general, una función del tiempo de frecuencia diaria, Fig. 3.8), que puede deducirse de la Ec. 3.3.

水轮机流量必须满足发电功率的设定值（一般是日频率时间的函数，图 3.8），该值可从公式 3.3 中推导出来。

$$Q_{turb}(t) = \frac{P_{gen}(t)}{\eta_T(t) \gamma H_u(t)} \quad (3.12)$$

En la que el salto útil, por su parte, está definido por la Ec. 3.13.

其中，有用水头通过公式 3.13 确定。

$$H_u(t) = N_{emb}(t) - J(Q_{turb}(t)) - N_{rest}(Q_s(t)) \quad (3.13)$$

Donde  $N_{emb}$  representa el nivel de agua en el embalse;  $J(Q_{turb}(t))$ , la sumatoria de las pérdidas de energía (friccionales y locales) a lo largo de la conducción forzada que conduce a las turbinas; y  $N_{rest}(Q_s(t))$ , el nivel de agua en la restitución del agua al cauce del río.

其中， $N_{emb}$  表示水库水位； $J(Q_{turb}(t))$  表示通往水轮机的水闸沿线的能量损失的总和（摩擦损失和局部损失）； $N_{rest}(Q_s(t))$  表示尾水水位。

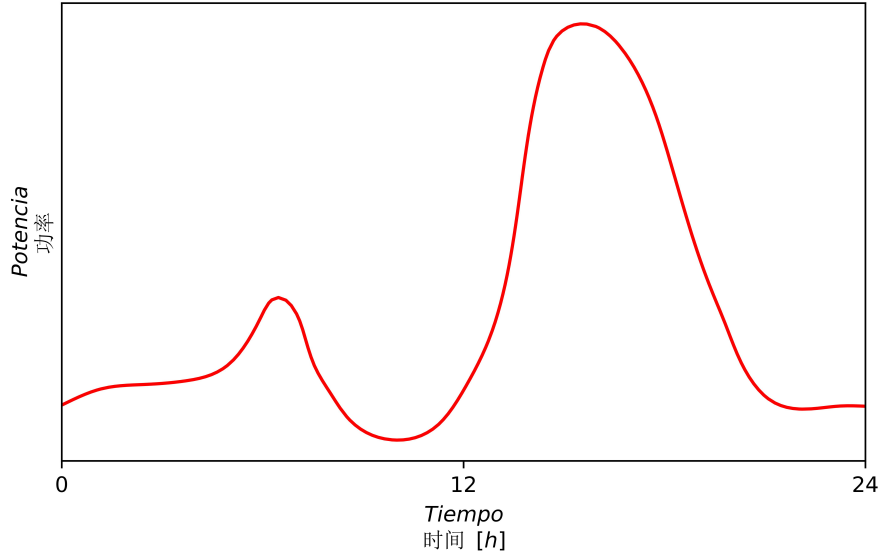


Figura 3.8: Demanda diaria de potencia

图 3.8: 每日电力需求图

La dependencia de las pérdidas de energía respecto del caudal turbinado, por un lado, y del nivel de restitución respecto del caudal saliente, por el otro, se pone en evidencia en la Ec. 3.13.

La naturaleza de esta dependencia es no lineal, de lo que se deduce que las Ecs. 3.12 y 3.13 conforman un sistema cuya resolución (que permite obtener la particular combinación de salto útil y caudal para satisfacer una demanda específica) requiere de un método iterativo.

从公式 3.13 中可以明显看出，能量损失一方面取决于水轮机流量，另一方面取决于流出量的尾水面。这种依赖关系的性质是非线性的，因此公式 3.12 和 3.13 构成了一个非线性关系。3.12 和 3.13 构成了一个系统，该系统（获得满足特定需求的有用水头和流量的特定组合）需要采用迭代法。

Por último, el caudal vertido,  $Q_{vert}(t)$ , está asociado con las condiciones de operación del embalse (véase la Sección 3.2.4).

最后，下泄流量  $Q_{vert}(t)$  与水库的运行条件有关（见第 3.2.4 节）。

Una vez definidas todas las variables intervinientes en la Ec. 3.11, su aplicación a lo largo de sucesivos lapsos de longitud  $\Delta t$  resulta en variaciones del volumen del embalse dadas por la Ec. 3.14.

一旦公式 3.11 中确定了所有相关变量，将其应用于长度为  $\Delta t$  的连续间隔，就会产生公式 3.14 所示的水库库容变化。

$$V(t + \Delta t) = V(t) + \Delta V(t) \quad (3.14)$$

Estas variaciones se reflejan en una fluctuación del nivel del embalse, en función de la particular ley que lo vincula con el volumen de agua almacenado (Ec. 3.15).

由于水库水位与储水量之前存在特定规律，这些变化会反映在水库水位的波动上（公式 3.15）。

$$N_{emb}(t) = N_{emb}(V(t)) \quad (3.15)$$

Como se ha dicho, el nivel del embalse cuenta con dos limitantes: los niveles máximo y mínimo normales. En función de ello, si el nivel del embalse calculado (Ec. 3.15) excede tales límites, debe corregirse de acuerdo con lo ilustrado en la Fig. 3.10.

如上所述，水库水位有两个限制因素：正常最高水位和最低水位。因此，如果计算出的水库水位（公式 3.15）超过了这些限制，就必须进行修正，如图 3.10 所示。

Los cálculos se repiten tantas veces como intervalos queden definidos por la discretización temporal del periodo de simulación (Fig. 3.9). Los resultados de esta simulación son series temporales de las variables involucradas (entre ellas,  $Q_e$ ,  $Q_{turb}$ ,  $N_{emb}$  y  $P_{gen}$ ).

根据模拟时间段的时间离散度，重复计算的次数与时间间隔相同（图 3.9）。模拟结果是相关变量（包括  $Q_e$ ,  $Q_{turb}$ ,  $N_{emb}$  和  $P_{gen}$ ）的时间序列。

En la medida en que el rendimiento,  $\eta_T$ , se asuma constante, el modelo así descrito es capaz de

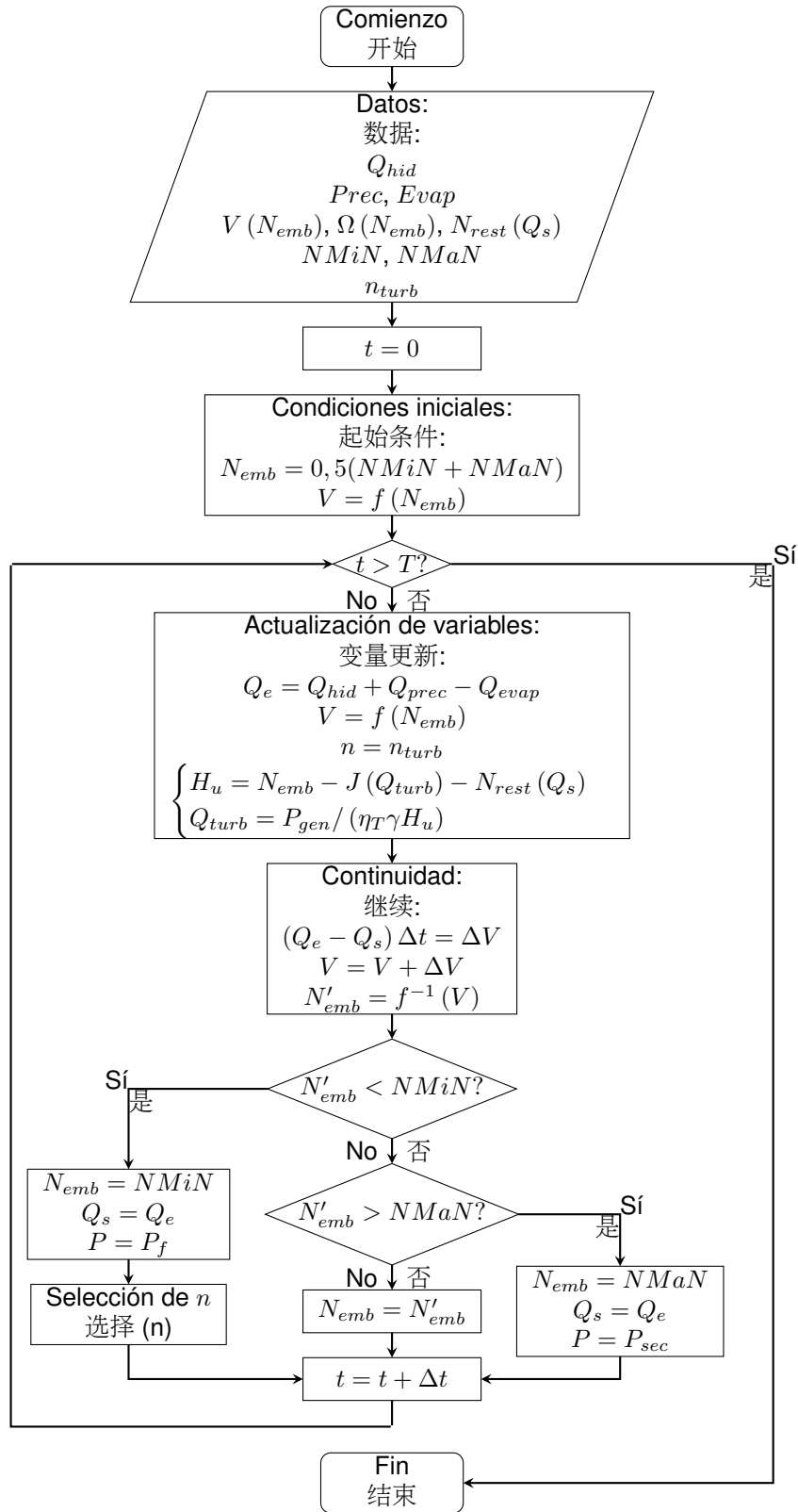


Figura 3.9: Esquema de cálculo del modelo de simulación de embalse con regulación

图 3.9: 带调节的水库模拟模型计算流程图

proveer resultados valiosos para la estimación de la energía generada por un aprovechamiento hidroeléctrico y, en consecuencia, para la evaluación de su factibilidad económica.

只要假定效率  $T$  不变，上述模型就能估算水电站预计产生的能量，进而为评估其经济性和可行性



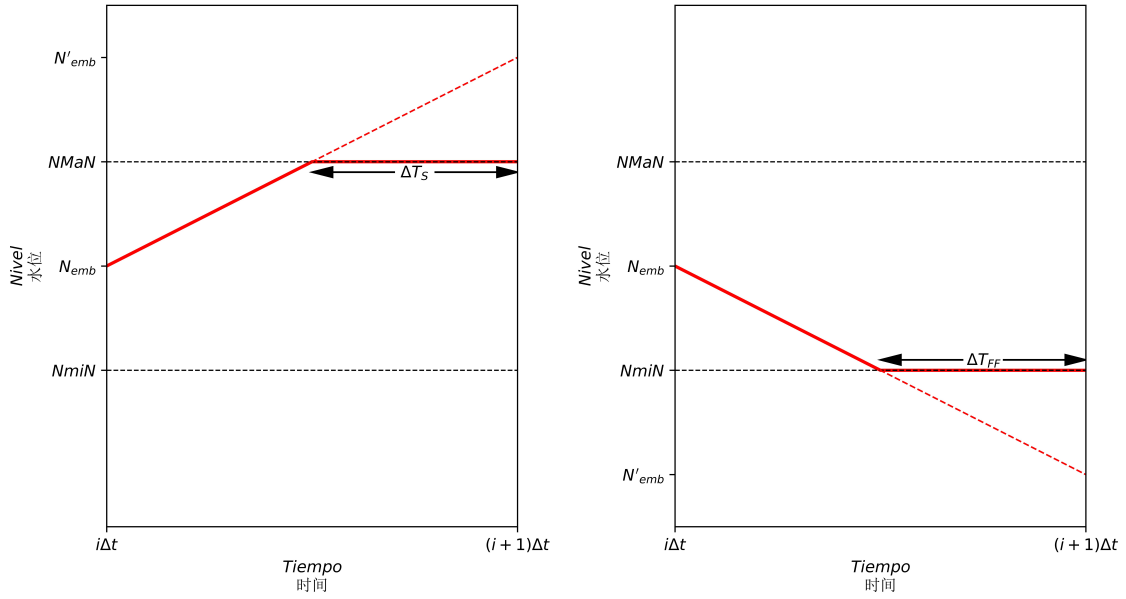


Figura 3.10: Corrección del nivel del embalse por los niveles máximo (izq.) y mínimo (der.) normales a lo largo del  $i$ -ésimo intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Asumiendo que el nivel del embalse varía linealmente a lo largo de ese lapso, pueden calcularse asimismo el tiempo durante el cual es posible generar potencia secundaria, por un lado ( $\Delta T_S = (N'_{emb} - NMaN) \Delta t / (N'_{emb} - N_{emb})$ ), y el tiempo de falla ( $\Delta T_{FF} = (NmiN - N'_{emb}) \Delta t / (N_{emb} - N'_{emb})$ ), por el otro

图 3.10: 根据第  $i$  个时间间隔  $t$  的正常最高 (左) 和最低 (右) 水位校正水库水位。假设水库水位在该时间跨度内呈线性变化, 则可计算出一个水库可进行二次发电的时间 ( $\Delta T_S = (N'_{emb} - NMaN) \Delta t / (N'_{emb} - N_{emb})$ ), 以及故障时间 ( $\Delta T_{FF} = (NmiN - N'_{emb}) \Delta t / (N_{emb} - N'_{emb})$ )

提供价值。

Asimismo, nótese que la Fig. 3.9 refiere a un proceso de selección del número de turbinas activas, que requiere de información propia del equipamiento electromecánico seleccionado (puede omitirse en otro caso) y de los procedimientos que se desarrollan en la Sección siguiente. El algoritmo implicado en este bloque se describe con más detalle en la Sección 3.5.

此外, 请注意图 3.9 所示的是有功水轮机台数的选择过程, 这需要所选机电设备的特定信息 (有时可省略) 和下一章节中所描述的程序。本部分所涉及的算法将在第 3.5 节中详细介绍。

### 3.3.1. Incorporación de las características del equipamiento electromecánico

纳入相关机电设备功能

En etapas posteriores del proyecto, el modelo, apropiadamente refinado, puede emplearse para evaluar el desempeño del equipamiento electromecánico, incorporando al modelo de simulación el diagrama de explotación de las turbinas, tal como fuera introducido en la Sección 3.2.6. A tal fin, la Ec. 3.13, desprovista de la dependencia temporal, puede reescribirse tal como sigue:

在项目的后期阶段, 可以通过将第 3.2.6 节中介绍的水轮机运行图纳入仿真模型, 对模型进行适当改进, 以用于评估机电设备的性能。为此, 公式 3.13 (剔除时间相关性) 可改写为:

$$N_{emb} - H_u - J(Q_{turb}) - N_{rest}(Q_s) = 0 \quad (3.16)$$

Bajo condiciones de operación normales (es decir, asumiendo, por un lado, que  $Q_{vert} = 0$  o, lo que es lo mismo, que  $Q_s = Q_{turb}$  y que el caudal proveniente del río es suficiente para generar la potencia solicitada), entonces, la Ec. 3.16 deviene:

在正常运行条件下（即一方面假定  $Q_{vert} = 0$ ，或换句话说， $Q_s = Q_{turb}$ ，即河水流量足以产生所需的功率），公式 3.16 可变为：

$$N_{emb} - H_u - J(Q_{turb}) - N_{rest}(Q_{turb}) = 0 \quad (3.17)$$

El salto útil,  $H_u$ , puede redefinirse invocando las Ec. 3.5 y 3.6 y asumiendo que los fenómenos transitorios son despreciables, o sea que  $\alpha = 1$ .

通过引用公式 3.5 和 3.6 并假设瞬态现象可以忽略不计，即  $\alpha = 1$ ，可以重新定义有用水头  $H_u$ 。

$$H_u = hH_R = (1 + \nu^2) WH(\theta) H_R$$

En la práctica, el valor de  $WH(\theta)$  correspondiente a un salto útil dado puede aproximarse por interpolación lineal entre las curvas de apertura de distribuidor constante entre las que yace el punto de operación. O sea:

在实践中，与给定有效水头相对应的  $WH(\theta)$  值，可通过位于操作点之间的导水机构开度曲线进行线性插值，取近似值，即

$$WH(\theta) = A_0 + A_1\theta \quad (3.18)$$

En la que  $A_0$  y  $A_1$  son coeficientes calculados en función de los puntos de las mencionadas curvas en la vecindad del punto de operación.

其中  $A_0$  和  $A_1$  是根据上述曲线上操作点附近，各点的函数计算得出的。

Dado que  $\theta = \arctan(\nu)$  (Ec. 3.6) y  $\nu = Q_{turb}/Q_R$  (Ec. 3.5), entonces la Ec. 3.17 deviene:

由于  $\theta = \arctan(\nu)$ （公式 3.6）且  $\nu = Q_{turb}/Q_R$ （公式 3.5），公式 3.17 可变为：

$$N_{emb} - \left[1 + \left(\frac{Q_{turb}}{Q_R}\right)^2\right] \left[A_0 + A_1 \arctan\left(\frac{Q_{turb}}{Q_R}\right)\right] H_R - J(Q_{turb}) - N_{rest}(Q_{turb}) = 0 \quad (3.19)$$

Que es una ecuación no lineal en  $Q_{turb}$  y, como tal, pasible de resolución por medio del método de Newton-Raphson. Según este, la raíz de una ecuación no lineal  $f(x)$  con derivada  $f'(x)$

puede aproximarse por aplicación sucesiva de la siguiente expresión:

这是  $Q_{turb}$  中的一个非线性方程，因此可以用牛顿拉斐逊法（Newton-Raphson）求解。按照这种方法，非线性方程  $f(x)$  的根及导数  $f'(x)$  可以通过连续应用下面的表达式，来求得近似值：

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$

Donde  $x_i$  representa la  $i$ -ésima aproximación de la raíz buscada de la ecuación en cuestión.

Sea entonces:

其中  $x_i$  代表方程根的第  $i$  个近似值。那么：

$$f(Q_{turb}) = N_{emb} - \left[ 1 + \left( \frac{Q_{turb}}{Q_R} \right)^2 \right] \left[ A_0 + A_1 \arctan \left( \frac{Q_{turb}}{Q_R} \right) \right] H_R - J(Q_{turb}) - N_{rest}(Q_{turb}) \quad (3.20)$$

El término de las pérdidas hidráulicas puede desagregarse, a su vez, en dos: las pérdidas friccionales, en función de la conocida ecuación de Darcy-Weisbach; y las locales, ocasionadas por cambios bruscos del escurrimiento en secciones específicas de la conducción a presión (Ec. 3.21).

水力损失又可细分为两部分：摩擦损失（基于著名的达西·韦斯巴赫方程，Darcy-Weisbach）和局部损失（由压力钢管特定部分的径流突变引起）（公式 3.21）。

$$J(Q_{turb}) = \frac{1}{2g} \frac{fL}{D} \left( \frac{Q_{turb}}{A} \right)^2 + \frac{1}{2g} \sum_i K_i \left( \frac{Q_{turb}}{A_i} \right)^2 \quad (3.21)$$

Donde  $f$ ,  $L$ ,  $D$  y  $A$  representan, respectivamente, el coeficiente de fricción, la longitud, el diámetro y el área transversal de la conducción que alimenta a las turbinas; y  $K_i$  y  $A_i$ , el coeficiente de la  $i$ -ésima pérdida local y el área de la sección transversal correspondiente, respectivamente.

其中， $f$ ,  $L$ ,  $D$  和  $A$  分别代表摩擦系数、给水轮机供水的管道长度、直径和横截面积； $K_i$  和  $A_i$  分别代表第  $i$  个局部损耗的系数和相应的横截面积。

La variación del nivel de restitución se adapta por lo general a una función potencial tal como la de la Ec. 3.22.

尾水水平面的变化通常与功率函数（如公式 3.22）相对应。

$$N_{rest}(Q_{turb}) = aQ_{turb}^b + c \quad (3.22)$$

Donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes dependientes de las unidades empleadas.

La Ec. 3.20 puede reescribirse entonces tal como sigue:

其中  $a$ ,  $b$  和  $c$  是单位常数。公式 3.20 可改写为：

$$f(Q_{turb}) = N_{emb} - \left[ 1 + \left( \frac{Q_{turb}}{Q_R} \right)^2 \right] \left[ A_0 + A_1 \arctan \left( \frac{Q_{turb}}{Q_R} \right) \right] H_R - \frac{fL}{2gDA^2} Q_{turb}^2 - \frac{1}{2g} \sum_i K_i \left( \frac{Q_{turb}}{A_i} \right)^2 - (aQ_{turb}^b + c)$$

Dadas estas equivalencias, la función derivada de  $f(Q_{turb})$  resulta:

有了这些等价关系，就得出了  $f(Q_{turb})$  的导数：

$$f'(Q_{turb}) = -\frac{H_R}{Q_R} \left\{ 2 \frac{Q_{turb}}{Q_R} \left[ A_1 + A_0 \arctan \left( \frac{Q_{turb}}{Q_R} \right) \right] + A_0 \right\} - \frac{fL}{gDA^2} Q_{turb} - \frac{1}{g} \sum_i K_i Q_{turb} \left( \frac{1}{A_i} \right)^2 - abQ_{turb}^{b-1}$$

Dados entonces un cierto nivel del embalse al comienzo de cada día (o de cada intervalo de tiempo en que se haya discretizado el lapso de la simulación) y una cierta demanda de potencia, el método propuesto permite hallar el caudal turbinado (y el salto útil correspondiente) capaz de proveerla asumiendo condiciones normales de operación.

在每天（或模拟跨度的每个时间间隔）开始时，给定一定的水库水位和一定的电力需求，所提出的方法可以模拟出在正常运行条件下，提供电力的水轮机流量（以及相应的有用水头）。

Durante periodos hídricamente ricos (es decir, cuando el caudal que afluye al embalse, en el nivel máximo normal, excede al suficiente para generar la potencia demandada), la potencia instalada impone un límite superior a la generación. El salto útil, en tal caso, resulta de la aplicación de la Ec. 3.16.

在富水期时（即水库正常最高水位下的入库水量超过发电量需求时），装机功率对发电量施加了上限。在这种情况下，有用水头由公式由 3.16 得出。

Durante periodos de estiaje, en cambio, la consigna de estacionar el nivel de embalse en su mínimo normal impone que todo el caudal que arriba al embalse sea turbinado, de tal modo que  $\nu = Q_e/Q_R$ .

在枯水期时，水库水位必须保持在正常的最低水平，这意味着所有进入水库的水流都要经过水轮机，因此  $\nu = Q_e/Q_R$ 。

Tal caudal, sin embargo, es, en la mayoría de los casos, insuficiente para generar la potencia instalada. En efecto, y dado que  $\beta = P_{gen}/P_R$  (Ec. 3.5), entonces la potencia generada puede determinarse por medio de la Ec. 3.23.

然而，这样的流速在大多数情况下，不足以达到装机功率。事实上，由于  $\beta = P_{gen}/P_R$ （公式 3.5），因此发电功率可通过公式 3.23 确定。

$$P_{gen} = \beta P_R = (1 + \nu^2) WB(\theta) P_R \quad (3.23)$$

Siguiendo un razonamiento análogo al que condujo a la Ec. 3.18:

根据类似于公式 3.18 的推理：

$$P_{gen} = \beta P_R = (1 + \nu^2) (B_1 + B_0\theta) P_R$$

Donde los coeficientes  $B_0$  y  $B_1$  son consistentes con el salto útil calculado con la Ec. 3.16.

其中系数  $B_0$  和  $B_1$  与公式 3.16 计算出的有用水头数值一致。

### 3.3.2. Consideraciones adicionales

其他考虑因素

#### Acerca de la operación intradiaria y el despacho de potencia empuntada

关于日间的操作和峰值功率调度

En el desarrollo de las ecuaciones básicas para la simulación de embalses con regulación (Sección 3.3), se calculó el caudal turbinado mediante la Ec. 3.12, que involucra una función de la potencia generada,  $P_{gen}$ , que responde a una particular demanda diaria (Fig. 3.8). Dado que esta función tiene un grado de resolución superior a la de la discretización del periodo de estudio (horaria respecto de diaria, semanal o mensual), se define un factor de utilización,  $F_u$ , que permite integrar la variabilidad horaria a lo largo del día, denotando la fracción de tiempo (respecto a un día) en que se espera generar la potencia instalada,  $P_{inst}$ , o la máxima potencia disponible (Fig. 3.11).

在制定调节水库模拟的基本方程时（第 3.3 节），水轮机流量是通过公式 3.12 计算的，这涉及到发电功率  $P_{gen}$  的函数，它与特定某日的需求对应（图 3.8）。由于该函数的分辨率高于研究时段的离散度（以小时为单位，而不是以天、周或月为单位），因此为整合全天的小时变化，确定了一个使用系数  $F_u$ ，表示（以天为单位的）装机功率  $P_{inst}$  或最大可用功率的预期发电时间（图 3.11）。

#### Acerca de la operación de múltiples turbinas simultáneamente

多台水轮机同时运行

A lo largo del desarrollo anterior, se asumió implícitamente que la generación corre por cuenta de una sola turbina; ello tiene implicaciones en el modo en que se calculan las pérdidas friccionales (Ec. 3.21), por un lado, y en el modo en que la potencia puede regularse durante los periodos

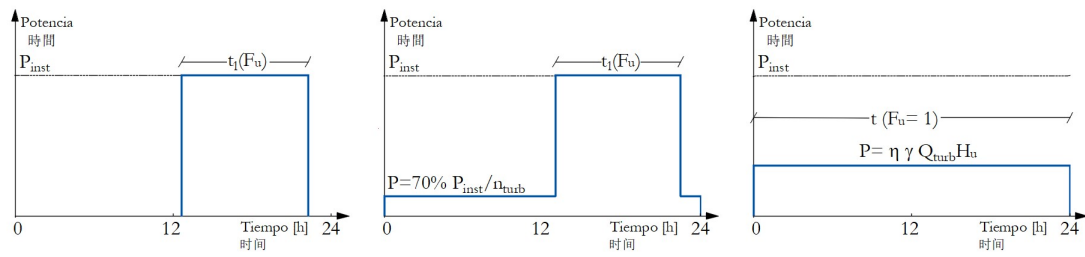


Figura 3.11: Factor de utilización para distintos esquemas de despacho de potencia: izq.:  $F_u < 1$ : generación en punta; centro:  $F_u < 1$ : generación combinada de base y en punta; der.:  $F_u = 1$ : generación de base

图 3.11: 不同电力调度方案的使用系数: 左图:  $F_u < 1$ : 高峰发电量; 中图:  $F_u < 1$ : 基本发电量和高峰发电量之和; 右图:  $F_u = 1$ : 基本发电量

de estiaje. En efecto, durante periodos de operación normal o de excedencia, es esperable que todas las turbinas de una central se encuentren en funcionamiento. Aun durante los periodos de estiaje, las condiciones más habituales involucran a más de una turbina en operación. En tales casos, las pérdidas de carga resultan función tanto del caudal turbinado como del número de unidades activas; en razón de que tales pérdidas están asociadas a cada una de sus respectivas tuberías de conducción, la Ec. 3.17 puede reescribirse tal como sigue.

在上述开发过程中，隐含的假设条件是只有一台水轮机发电；这对摩擦损失的计算有所影响。（公式 3.21），以及在非高峰期调节电力的方式。事实上，在正常或过量运行期间，水电站的所有水轮机都会运行。即使在枯水期，最常见的情况也是不止一台水轮机在运行。在这种情况下，水头损失是水轮机流量和运行机组数量的函数；由于这些损失与各自的压力钢管有关，公式 3.17 可改写为：

$$N_{emb} - H_u - J(Q_{turb}/n) - N_{rest}(Q_{turb}) = 0$$

Donde  $n$  representa el número de turbinas activas en un lapso dado.

其中， $n$  代表在给定时间跨度内运行的水轮机数量

### Cambios en la potencia generada en periodos de déficit

亏空期发电量的变化

Durante periodos de bajo caudal, el aprovechamiento de la menguante potencia disponible del río se consigue no solo gracias a cambios en el punto de operación de la(s) turbina(s) sino también al sucesivo apagado de las unidades activas conforme las restricciones son cada vez más exigentes. Esta situación es extrapolable a aprovechamientos sin regulación (véase el Escenario 3, en la Sección 4.2). En la medida en que las regiones de explotación correspondientes a distintos números de unidades activas definan un continuo -o sea, se solapen las condiciones de generación-, el sucesivo apagado de turbinas no involucra ninguna consigna adicional. Cuando el número de turbinas activas es reducido, sin embargo, suelen aparecer brechas entre los

distintos rangos de explotación (Fig. 3.12), por efecto de que la máxima potencia generada por un dado número de unidades activas es menor a la mínima potencia generada por el número inmediatamente superior. O sea:

在低流量期间，不仅要通过改变水轮机的操作点来利用河流不断减少的可用电能，而且还要通过连续关闭有功机组来实现，因为限制条件变得越来越苛刻。这种情况可以推断为无调节能力的水利开发项目（见第 4.2 节中的方案 3）。只要不同有功机组数量对应的运行区域是连续的（即发电条件重叠），则连续关停水轮机不涉及任何额外的设定值。然而，当有功的水轮机数量较少时，不同运行区间之间往往会出现间隙（图 3.12），因为一定数量的有功机组所产生的最大功率低于最大数量机组所产生的最小功率。换句话说：

$$(n - 1) P_{u_{max}} < n P_{u_{min}}$$

Donde  $P_{u_{max}}$  y  $P_{u_{min}}$  representan las potencias máxima y mínima por unidad. Para un salto,  $H_u$ , dado, vale entonces la siguiente desigualdad:

其中， $P_{u_{max}}$  和  $P_{u_{min}}$  分别代表每个单位的最大和最小功率。对于给定的水头  $H_u$ ，以下不等式成立：

$$(n - 1) Q_{u_{max}} < n Q_{u_{min}}$$

Donde  $Q_{u_{max}}$  y  $Q_{u_{min}}$  representan los caudales turbinados máximo y mínimo por unidad, en correspondencia con los valores de  $P_{u_{max}}$  y  $P_{u_{min}}$ .

其中， $Q_{u_{max}}$  和  $Q_{u_{min}}$  表示与  $P_{u_{max}}$  和  $P_{u_{min}}$  值相对应的最大和最小单位的水轮机流量。

A fin de optimizar el aprovechamiento de la energía disponible en casos semejantes, puede incrementarse el caudal turbinable por efecto de una regulación intradiaria que supone la reducción del factor de utilización,  $F_u$ , de tal manera que el caudal total turbinado resulta  $Q_{turb} = Q_e / F_u$ , si  $Q_{turb} > n Q_{u_{min}}$ , lo cual es válido, para el caso ilustrado en la Fig. 3.12, para valores de  $n$  entre 1 y 2.

在这种情况下，为了优化可用能量，可以通过日内调节来增加水轮机流量，从而降低利用系数  $F_u$ ，这样，如果  $Q_{turb} > n Q_{u_{min}}$ ，则总可水轮机流量为  $Q_{turb} = Q_e / F_u$ ，对于图 3.12 所示的情况， $n$  值在 1 和 2 之间时有效。

### 3.4. Esquema numérico de una central sin regulación

#### 无调节能力的水电站数值

Cuando los ríos aprovechables discurren por regiones relativamente llanas, de tal manera que una elevación del nivel solo es posible a expensas de la inundación de una vasta superficie,

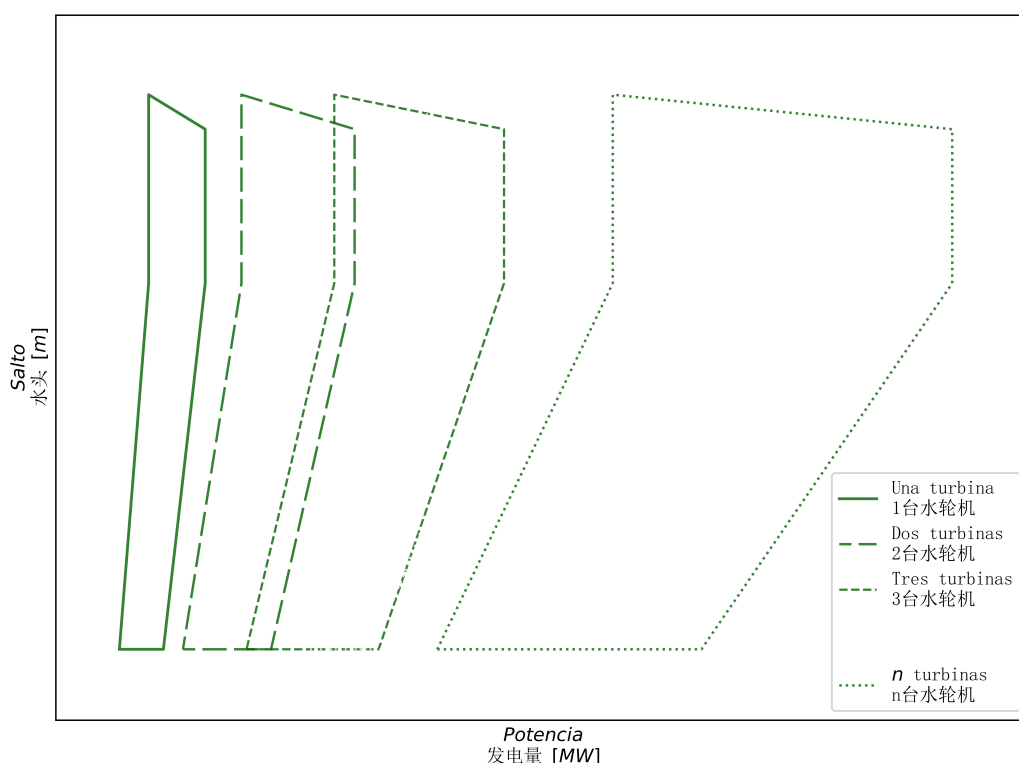


Figura 3.12: Rangos de explotación de una serie de grupos de turbinas. El solapamiento de regiones correspondientes a grupos de distintos números de unidades encendidas permite adaptar la magnitud de la generación a la decreciente potencia disponible. Las brechas entre las regiones de 1 y 2 turbinas activas fuerzan una regulación intradiaria del embalse

图 3.12: 若干水轮机组的运行范围。与不同数量的机组相对应的区域重叠，可以使发电量适应不断减少的可用功率。1 台和 2 台有功水轮机区域之间的间隙迫使水库进行日间调节

suele recurrirse a centrales hidroeléctricas sin regulación. Se trata de una opción viable aun si la topografía fuera más propicia, pero el embalse respondiera a fines distintos de la generación de energía, o bien las condiciones hidrológicas o las de la demanda fueran compatibles. Aunque esta opción puede simplificar la operación, plantea desafíos en términos de gestión de la producción energética y estabilidad de la red eléctrica.

当可利用的河流流经相对平坦的地区时，只有以淹没大片地区为代价才有可能提高水位，因此通常会使用不受管制的水电站。即使地形比较有利，但水库的用途不是发电，或者水文或需求条件符合要求，这种方案也是可行的。虽然这种方案可以简化操作，但在能源生产管理和电网稳定性方面却带来了挑战。

Al no disponer de un volumen de almacenamiento significativo -el nivel del embalse permanece esencialmente fijo-, la operación de una central sin regulación (Fig. 3.13) impone que la totalidad del agua que afluye al embalse discurra hacia aguas abajo, entregando, a su paso por la sección de las turbinas, la potencia de que dispone. En los términos del algoritmo de cálculo, esto es cierto en cada uno de los intervalos en los que se discretiza el periodo analizado, sea este un día, un mes, etcétera.

在没有大量蓄水的情况下（水库水位基本固定），无调节电站的运行（图 3.13）要求所有流入水库



的水都流向下游，在通过水轮机部分时提供可用的功率。从计算算法的角度来看，在分析期间的每个时间段，无论是一天还是一个个月，都是如此。

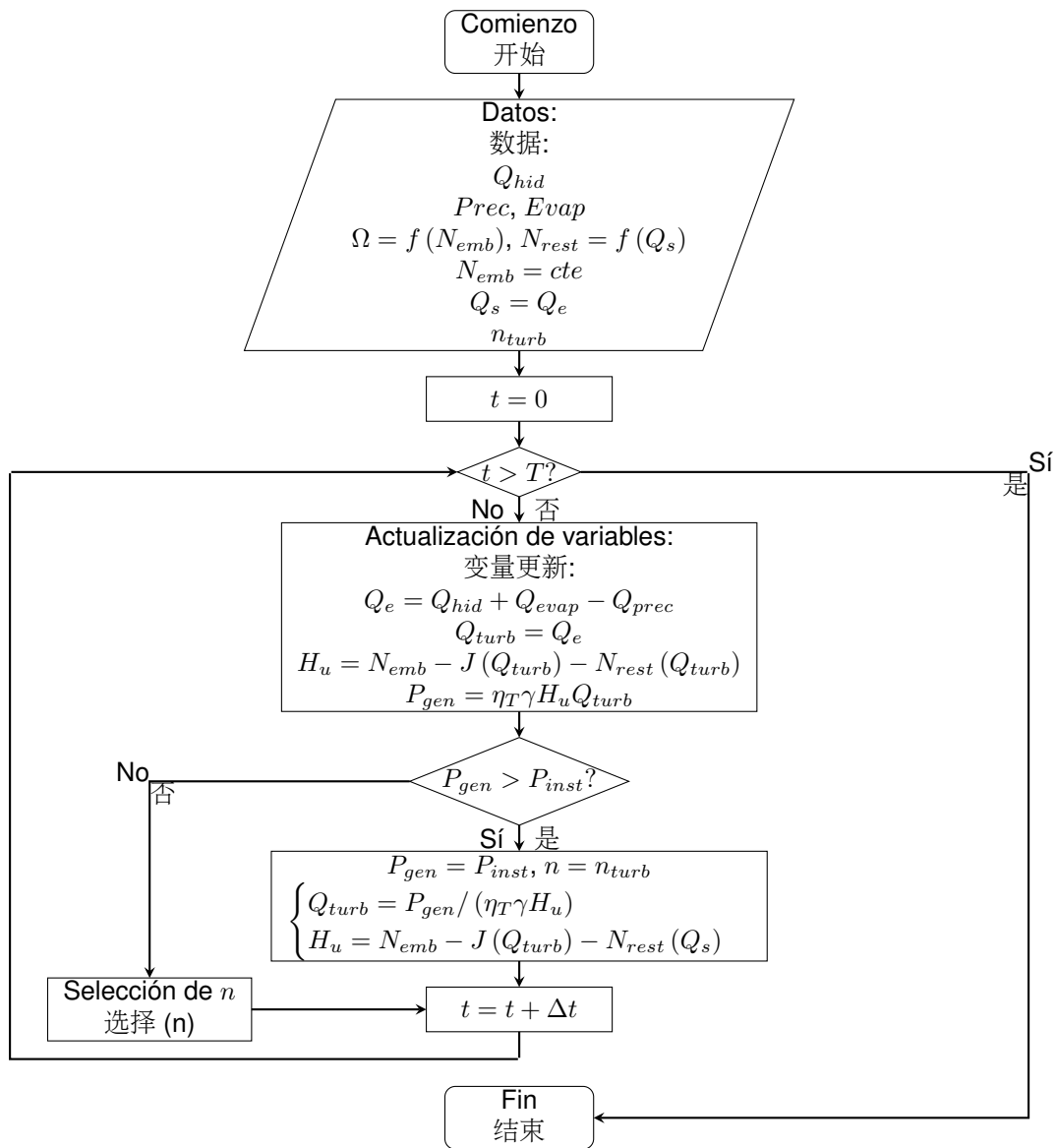


Figura 3.13: Esquema de cálculo del modelo de simulación de embalse sin regulación

图 3.13: 无调节水库模型的计算图表

Dado que la potencia hidráulica es sumamente fluctuante, en reflejo de la propia variabilidad del caudal del río, el grado de aprovechamiento que se haga de esta depende de la flexibilidad con que cuente la central para asimilarla. En la práctica, esta flexibilidad se logra por medio de dos variables: la amplitud del rango de explotación de las turbinas, por un lado, y el número que albergue la central hidroeléctrica, por el otro. En relación a esta última, nótese que la Fig. 3.13 incluye, al igual que la Fig. 3.9, un bloque alusivo a la selección de turbinas activas. Esa es la materia de la Sección siguiente.

由于水力发电的波动性很大，反映了河流流量的变化，因此水力发电的利用程度取决于水电站吸收水力发电的灵活性。在实践中，这种灵活性是通过两个变量来实现的：一方面是水轮机的运行范围，另一方面是水电站中水轮机的数量。关于后者，请注意图 3.13 和图 3.9 一样，包含了一个

关于选择有功水轮机的模块。这将是下一节的主题。

### 3.5. Selección del número de turbinas activas

#### 选择运行中涡轮机的数量

El esquema de cálculo (tanto para embalses con como sin regulación) debe determinar cuál es el número de turbinas que tienen que entrar en operación a fin de generar la potencia disponible en el río (Fig. 3.14). Ello equivale a encontrar qué combinación del número de turbinas, caudal y salto cae entre los límites del rango de explotación de la central hidroeléctrica (el área bordeada por los límites definidos en la Fig. 3.12), o sea,  $(n, Q_e, H_u) \in \text{Rango}$ . Nótese que puede que esta combinación no sea única; vale decir, que la misma potencia pueda generarse con distintos números de turbinas en operación aunque bajo distintas condiciones de explotación. La naturaleza de la búsqueda (que procede de mayor a menor), sin embargo, hace que, de las combinaciones posibles, se seleccionen aquellas correspondientes al mayor número de turbinas. La potencia generada para un intervalo cualquiera, en cualquier caso, corresponde a la combinación particular elegida:  $P_{gen} = P(n, Q_e, H_u)$ .

计算方案（适用于调节水库和非调节水库）必须确定必须运行多少台水轮机才能在河流中发出电能（图 3.14）。这就相当于找到水轮机数量、流量和水头的哪种组合对应水电站运行范围（图 3.12 中定义的边界区域），即  $(n, Q_e, H_u) \in \text{范围}$ 。需要注意的是，这种组合可能不是唯一的。在不同的运行条件下，不同数量的水轮机可以产生相同的功率。然而，搜索的性质（从高到低）意味着，在可能的组合中，会选择对应水轮机数量最多的组合。在任何情况下，任何给定区间的发电量都与所选的特定组合相对应： $P_{gen} = P(n, Q_e, H_u)$ 。

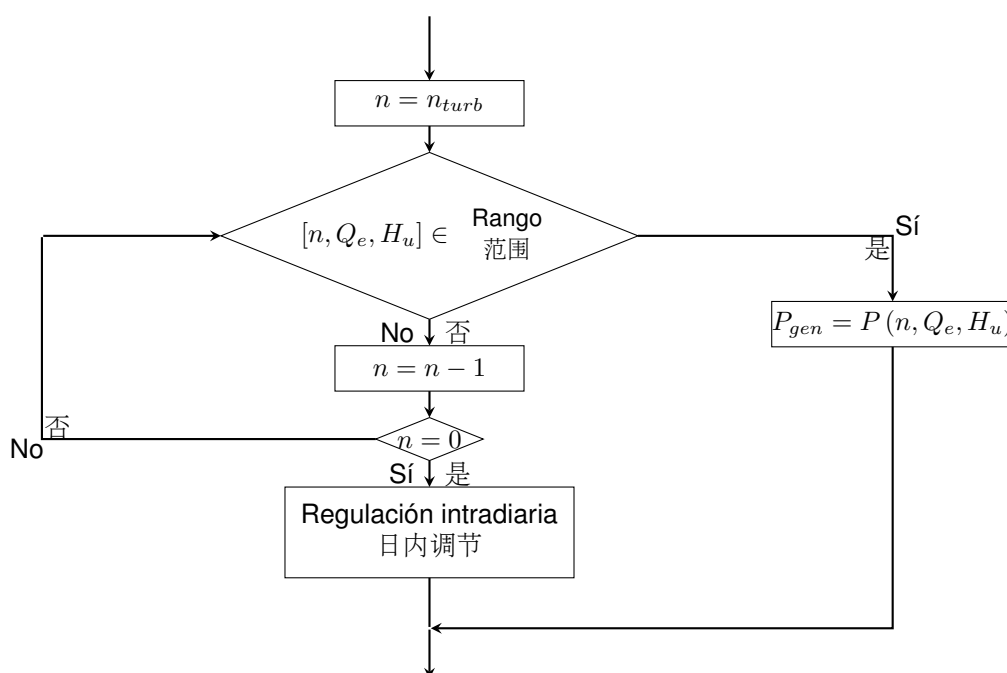


Figura 3.14: Bloque correspondiente a la selección del número de turbinas activas

图 3.14: 运行水轮机数量选择模块

Como se ha sugerido en la Sección 3.3.2, sin embargo, es posible que pueda requerirse de una regulación intradiaria; en otras palabras, en los términos del esquema de la Fig. 3.14, es posible que la búsqueda del número de turbinas en operación,  $n$ , no arroje resultados. En tal caso, se inicia una nueva búsqueda, esta vez orientada a las brechas de los rangos de explotación descriptas en la Fig. 3.12 (Fig. 3.15).

然而，如第 3.3.2 节所述，可能需要进行日内调节；换句话说，按照图 3.14 中的方案，对运行风机数量  $n$  的搜索可能没有结果。在这种情况下，需要重新搜索，这次搜索的目标是图 3.12 中描述的运行范围缺口（图 3.15）。

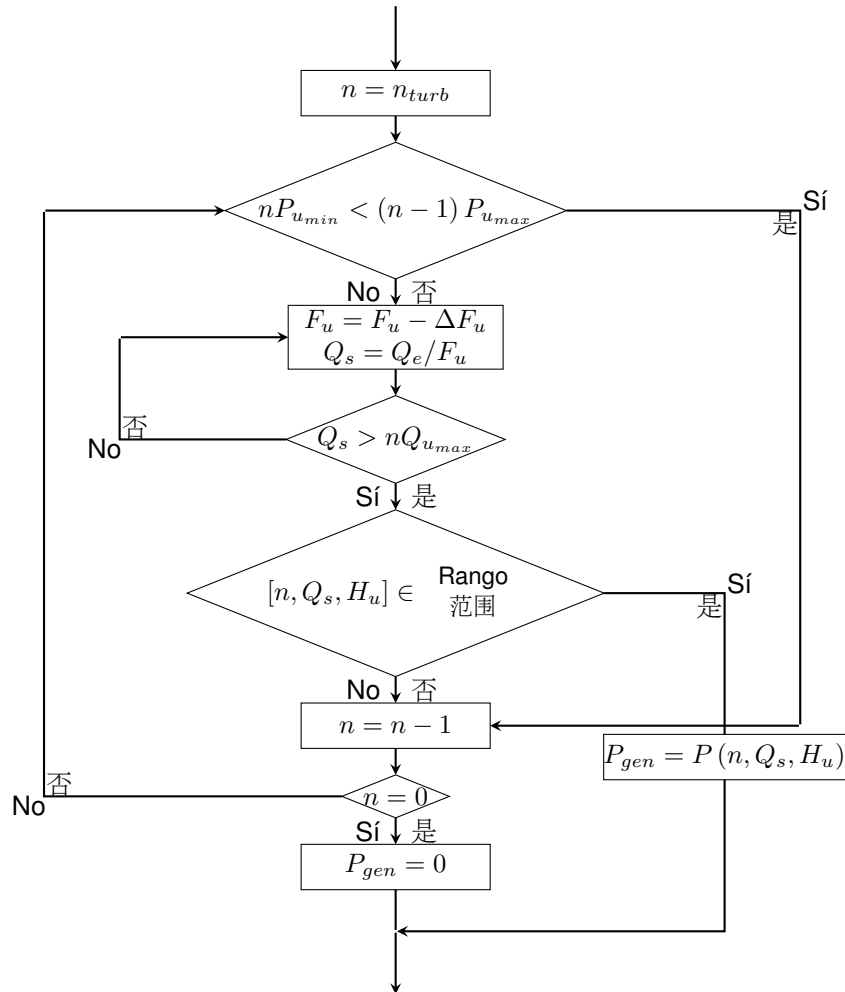


Figura 3.15: Bloque correspondiente a la regulación intradiaria (Fig. 3.14)

图 3.15: 日内调节模块（对应图 3.14）

La regulación intradiaria supone, como se ha dicho, la reducción del factor de utilización, de tal manera de erogar el mismo volumen de agua durante un tiempo más breve, o sea, a un caudal superior al proveniente del río. Esta reducción se estima por el cálculo recurrente de la expresión  $F_u - \Delta F_u$ , donde  $\Delta F_u$  es una fracción suficientemente pequeña, hasta que el caudal turbinable,  $Q_{turb} (= Q_e / F_u)$ , sea igual a un múltiplo del mínimo caudal por turbina.

如上所述，日内调节包括降低利用系数，以便在较短时间内提供相同水量，即以高于河水流速的水量供水。通过反复计算  $F_u - \Delta F_u$ （其中  $\Delta F_u$  是一个足够小的分数）来估算利用率的降低，直

到可调节流量  $Q_{turb} (= Q_e/F_u)$  等于每个水轮机最小流量的倍数。



# CAPÍTULO 4

## 第四章

### Aplicación del modelo al aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz

#### 圣克鲁斯河水力发电站的模型应用

El río Santa Cruz nace en el Lago Argentino, en el oeste de la Patagonia argentina. Su caudal es periódicamente medido en la estación de aforo Charles Fuhr, a poca distancia aguas abajo. Las presas NK y JC se están levantando más hacia el este. Su objetivo es la elevación del nivel de la superficie libre por retención de un cierto volumen de agua, a los efectos de materializar la energía potencial que será fuente de electricidad. La generación de energía eléctrica supone, por tanto, una transformación que es llevada a cabo por las 5 turbinas Francis y las 3 turbinas Kaplan de las centrales hidroeléctricas NK y JC, respectivamente.

圣克鲁斯河发源于阿根廷巴塔哥尼亚西部的阿根廷湖，其流量在位于下游不远处的 Charles Fuhr 流量监测站定期进行测量。NK 水坝和 JC 水坝正在河流更靠近东部的位置建设。它们的目的是通过储存一定体积的水来抬高自由水面的高度，从而实现水的位能转化，作为发电的能源来源。因此，发电是由 NK 水电站的 5 台弗朗西斯水轮机和 JC 水电站的 3 台卡普兰水轮机完成的能量转化过程。

Las aguas emanadas por la central NK alimentan el embalse JC y son restituidas nuevamente al río tras ser turbinadas (Fig. 4.1).

NK 水电站排放的水流将进入 JC 水库，经过 JC 水电站水轮机发电后，水流重新回到圣克鲁斯河（见图 4.1）。

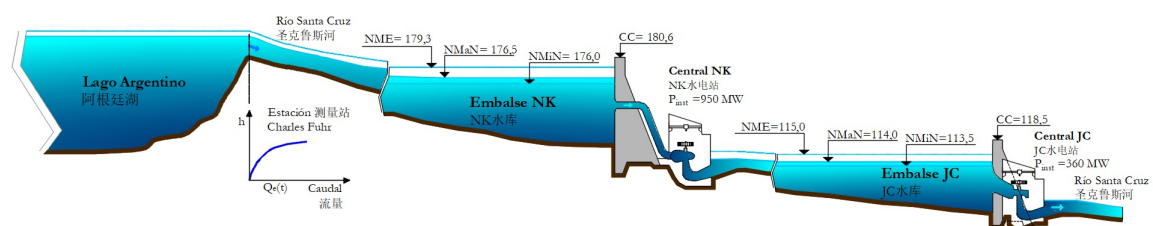


Figura 4.1: Esquema del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz

图 4.1: 圣克鲁斯河水力发电开发示意图

La serie hidrológica se conforma por una sucesión de valores medios diarios. Las variaciones horarias de generación eléctrica (y, consecuentemente, del escurrimiento de agua a través de las turbinas de las centrales) están contempladas en los esquemas de despacho de potencia y el factor de utilización diario, que se expresa como la fracción del día durante el cual opera la central.

水文系列由每日的平均数值组成。发电的小时变化（以及水流通过水电站水轮机的相应变化）已在电力调度方案和日利用系数中进行考虑，后者表示水电站每日运行时段的比例。

## **4.1. Condiciones particulares de los embalses sobre el río Santa Cruz**

### **圣克鲁斯河水库的特定条件**

Una de las particularidades más relevantes de estas obras involucra las limitaciones que el medio ambiente impone al proyecto. En ese sentido, la presa NK deberá garantizar que su nivel acompañe las oscilaciones naturales del Lago Argentino que no están asociadas a los eventos de rotura del glaciar. Es por tal razón que las alternativas previstas en el anteproyecto del año 1978 fueran descartadas. El criterio actual propende a que los niveles de operación del embalse NK no deberán superar los niveles máximos diarios históricos, tal como fueran estimados por análisis basados en la aplicación de series de Fourier sobre datos recabados de planillas limnimétricas del Lago Argentino.

这些工程项目最显著的特点之一是环境条件对项目施加的限制。在这方面，NK 水坝必须确保其水位能够适应阿根廷湖的自然波动，而这些波动并非由于冰川断裂事件引起。因此，1978 年初步设计中所提出的方案被全部废弃。当前的设计标准要求，NK 水库的运行水位不得超过历史上估算的日最大水位，该数值是基于对阿根廷湖水位观测数据应用傅里叶级数分析法所得出的结果。

Si el nivel energético del embalse en el eje de la central, para un determinado caudal del río Santa Cruz, afectara, por causa de la curva de remanso, el tramo de aguas arriba de la sección de control, excediendo el nivel natural del Lago Argentino, la ley natural de descarga y/o la oscilación natural del lago se verían alteradas.

如果圣克鲁斯河在特定流量下，水库在电站轴线处的能量水位因回水曲线影响到控制断面上游河段，导致水位超过阿根廷湖的自然水位，则可能会改变湖泊的自然排水规律和/或湖泊的自然波动。

Este criterio de ‘desacople’ de los fenómenos inducidos por la operación del embalse y los propios del lago fue desarrollado en el informe realizado por la Universidad Nacional de La Plata (y validado por un experto internacional, el Ing. Ascencio Lara) titulado “Funcionamiento del sistema Lago Argentino-Río Santa Cruz-Embalse Condor Cliff” (UNLP, 2015). Este estudio sustentó a la selección final de un nivel máximo normal de 176,5 m para la central hidroeléctrica NK.

这种将水库运行所引起的影响与湖泊本身的自然现象“脱耦”的标准，源于由拉普拉塔国立大学完成的一份报告（经国际专家 **Ascencio Lara** 工程师验证），报告题为《阿根廷湖—圣克鲁斯河—Condor Cliff 水库系统运行机制》（UNLP, 2015）。该研究为 NK 水电站 176.5 高程的最终正常最高水位的选择提供了科学依据。

#### 4.1.1. Serie hidrológica del río Santa Cruz

##### 圣克鲁斯河的水文系列

La serie de caudales empleada fue la extraída de la Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Nación, sobre la base de los registros hidrométricos de la estación hidrológica 2802 - Charles Fuhr durante el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1956 y el 31 de diciembre 2021. No obstante, el registro es discontinuo, con faltantes prolongados, por lo cual se ignoraron los años 1956, 1957, 1958, 1972, 1973, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1990, 1991 y 1992. La serie hidrológica resultante (Fig. 4.2) cuenta entonces con 47 años de longitud y es capaz de capturar la estacionalidad anual del río Santa Cruz, con ciclos que tocan máximos durante el mes de marzo y mínimos alrededor de septiembre.

所使用的流量系列数据源自国家水文信息系统数据库，基于 Charles Fuhr 水文站（站号 2802）在 1956 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日期间的水文观测记录。然而，该记录存在不连续性，且有较长时间的数据缺失。因此，1956、1957、1958、1972、1973、1975、1976、1977、1978、1979、1980、1981、1982、1983、1984、1985、1990、1991 和 1992 年被排除在外。最终得到的水文系列（见图 4.2）涵盖 47 年的观测数据，能够反映圣克鲁斯河的年度季节性变化，其周期特征表现为：3 月达到最大流量，而 9 月左右则为最小流量。

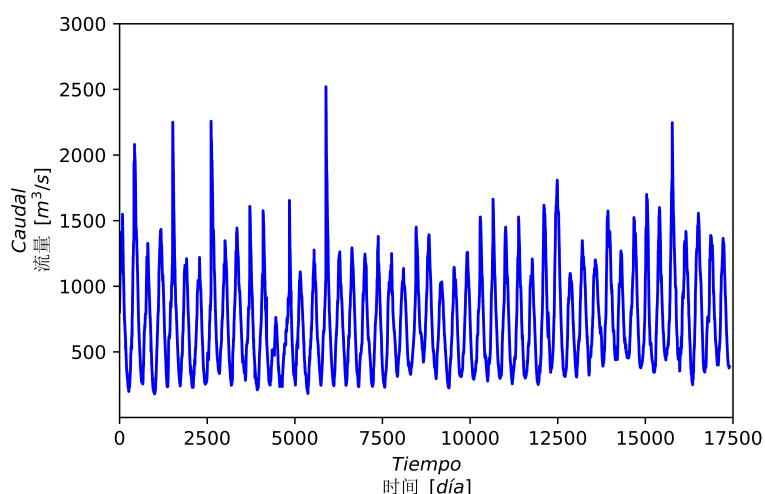


Figura 4.2: Serie hidrológica del río Santa Cruz registrada en la estación Charles Fuhr

图 4.2: 在 Charles Fuhr 站记录的圣克鲁斯河水文系列



#### 4.1.2. Datos meteorológicos

##### 气象数据

Los datos de precipitación que afecta la región fueron extraídos de un pluviómetro ubicado en la estación Charles Fuhr, que cuenta con mediciones diarias desde 1955. Los datos de la evaporación potencial, por su parte, se estimaron sobre los registros de un tanque de evaporación de clase A ubicado en la estación El Calafate, con mediciones diarias desde 1993. Esta última serie cuenta con una proporción considerable de datos faltantes entre los meses de mayo y agosto, por causa del congelamiento del tanque. Ambas series fueron obtenidas de la Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Nación.

影响该区域的降水数据来自 Charles Fuhr 站的雨量计，自 1955 年以来提供每日测量数据。另一方面，潜在蒸发量数据是基于位于 El Calafate 站的 A 级蒸发皿观测记录估算而得，自 1993 年起进行每日测量。然而，由于蒸发皿在 5 月至 8 月期间发生结冰现象，该系列在此期间存在较大比例的数据缺失。上述两组数据均源自国家水文信息系统数据库。

Por motivos tan diversos como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento, la radiación solar y aun el material y el tamaño del tanque, la evaporación registrada suele sobrestimar la esperable en los embalses. En consecuencia, esta última suele estimarse por aplicación de un coeficiente corrector igual a 0,7.

由于诸如空气温度、相对湿度、风速、太阳辐射，以及蒸发皿的材质和尺寸等多种因素的影响，蒸发量的观测结果通常会高估水库的实际蒸发量。因此，实际蒸发量一般通过施加修正系数（取值为 0.7）进行估算。

El balance hídrico se calculó como la diferencia, día a día, entre los valores de precipitación y evaporación en el periodo 1993-2016. A los efectos de este estudio, sin embargo, una resolución mensual es suficiente (Fig. 4.3).

水量平衡是根据降水量和蒸发量之间的日差值进行计算的，时间跨度为 1993 年至 2016 年。然而，针对本研究，使用月度分辨率已足够（见图 4.3）。

#### 4.1.3. Relaciones nivel-área y nivel-volumen

##### 水位-面积与水位-体积关系

El agua de un embalse queda contenida por el volumen delimitado por la superficie del terreno y su superficie libre; la primera puede replicarse gracias a relevamientos topográficos; la segunda, al igual que el volumen mismo, es función del nivel del agua. Los embalses pueden caracterizarse entonces por las relaciones peculiares que vinculan los niveles previsibles del agua con el volumen almacenado y con la superficie libre.

水库中的水被地形表面与自由水面之间的体积所容纳；前者可以通过地形测量进行复刻，而后者及水库体积本身均是水位的函数。因此，水库可以通过其独特的关系来表征，即水位与储存体积

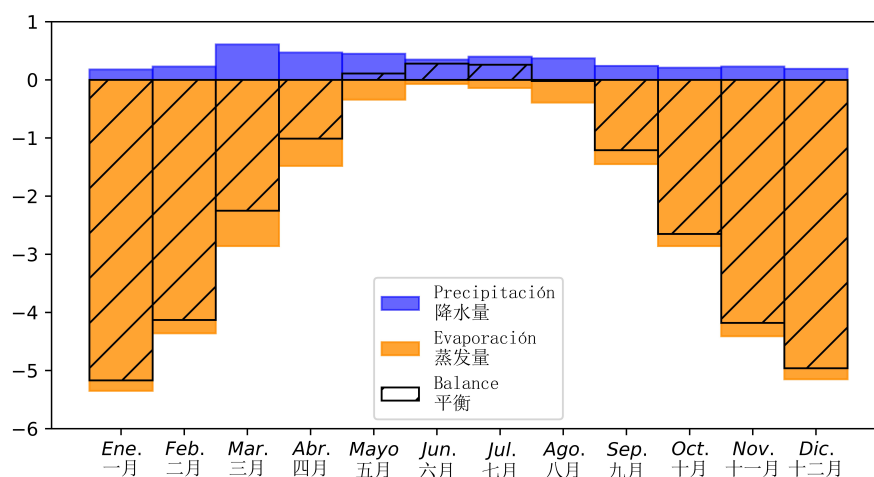


Figura 4.3: Datos medios mensuales de evaporación y precipitación [mm]

图 4.3: 月均蒸发量和降水量数据 [mm]

及自由水面面积之间的联系。

Las Tablas 4.1 y 4.2, lo mismo que la Fig. 4.4, reflejan las relaciones encontradas para las presas NK y JC.

表 4.1 和 4.2 以及图 4.4 反映了 NK 大坝和 JC 大坝的关系

Tabla 4.1: Volumen y área expuesta del embalse NK como función del nivel de embalse

表 4.1: NK 水库的容积和暴露面积与水位的函数关系

Nivel de embalse [m] 水库水位 [m]	Volumen [Hm <sup>3</sup> ] 体积 [Hm <sup>3</sup> ]	Área [km <sup>2</sup> ] 面积 [km <sup>2</sup> ]
115	1,2	0,1
120	10,0	3,2
125	41,0	8,9
130	107,0	17,6
135	231,2	31,2
140	425,9	46,8
145	712,9	67,9
150	1104,9	90,2
155	1648,1	124,2
160	2341,4	153,6
165	3190,2	186,4
170	4209,8	221,3
175	5409,0	256,2
177	5929,4	263,4

Tabla 4.2: Volumen y área expuesta del embalse JC como función del nivel de embalse

表 4.2: JC 水库的容积和暴露面积与水位的函数关系

Nivel de embalse [m] 水库水位 [m]	Volumen [Hm <sup>3</sup> ] 体积 [Hm <sup>3</sup> ]	Área [km <sup>2</sup> ] 面积 [km <sup>2</sup> ]
90	79,3	35,0
95	330,9	63,4
100	725,5	94,4
105	1343,9	151,4
110	2191,3	182,4
114	2968,8	205,8
115	3177,9	209,5
116	3729,8	217,4
117	3956,2	223,9
118	4186,6	229,0
119	4419,8	231,8
120	4655,7	234,6
121	4895,6	237,4
122	5140,3	242,4

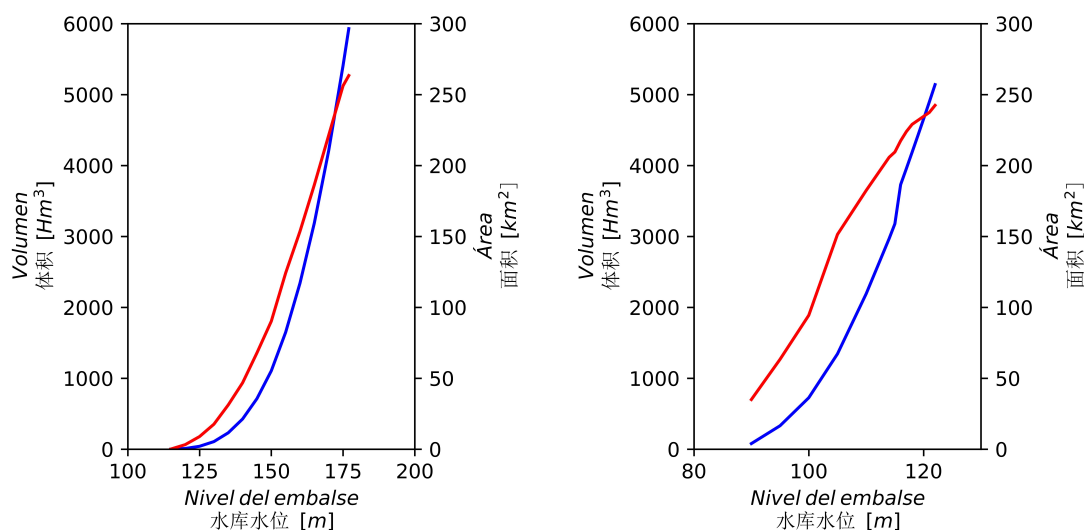


Figura 4.4: Leyes nivel-volumen (azul) y nivel-área (rojo) correspondientes a las presas NK (izq.) y JC (der.)

图 4.4: 水位-体积关系（蓝色）与水位-面积关系（红色），对应 NK 水坝（左）和 JC 水坝（右）

#### 4.1.4. Niveles de operación

##### 运行水位

En pos de eliminar el impacto que la elevación de los niveles del río pudiera ocasionar sobre el Lago Argentino, se adoptó un nivel máximo normal de 176,5 m para el embalse NK. Por su parte, el nivel mínimo normal seleccionado, de 176 m, es congruente con el salto mínimo de operación de las turbinas. Si bien estos niveles no bastan para proporcionarle al embalse capacidad de regulación estacional, sí permiten morigerar las oscilaciones diarias inducidas por la operación en punta. Por último, el nivel máximo extraordinario, correspondiente a la ocurrencia de crecidas máximas excepcionales, asciende a 179,3 m.

为了消除河流水位升高对阿根廷湖可能产生的影响，NK 水库采用了 176.5 米的正常最高运行水位。同时，所选的正常最低运行水位为 176 米，该水位与水轮机的最小运行水头要求保持一致。虽然这些水位不能为水库提供季节性调节能力，但能够缓解因水电站高峰运行所引起的日波动。

El nivel del embalse JC, por su parte, es de 114 m y contempla tanto el propósito de generación de energía como el de evacuación de crecidas.

此外，针对极端洪水发生时的最大水位，NK 水库设定为 179.3 米。而 JC 水库设定为 114 米，该水位同时考虑了发电需求与洪水调度的双重目的。

#### 4.1.5. Ley de restitución

##### 尾水法则

El salto útil disponible es de vital importancia en la estimación de la generación hidroeléctrica, por lo cual es necesario contar con la cota del río en la sección inmediatamente aguas abajo de la central en función del caudal restituído al cauce. Estas relaciones (Tablas 4.3 y 4.4 y Fig. 4.5) fueron obtenidas a partir de modelos unidimensionales del escurrimiento a superficie libre las obras. La curva obtenida para la central NK contempla los efectos del remanso producido por el embalsamiento de las aguas por la presa JC, aguas abajo.

有效水头是估算水电站发电量的关键参数，因此需要确定电站下游河段的水位与回流到河道的流量之间的关系。这些关系（见表 4.3、表 4.4 及图 4.5）是通过对水工结构进行一维自由水面流动模型计算而得出的。针对 NK 水电站所得到的曲线，已考虑到下游 JC 水坝蓄水所引起的回水效应的影响。

Tabla 4.3: Ley nivel de restitución versus caudal de la presa NK

表 4.3: NK 水坝回水水位与流量关系

$Q$ [m <sup>3</sup> /s] 流量 [m <sup>3</sup> /s]	$N_{rest}$ [m] 回水水位 [m]
350	114,72
500	115,13
700	115,68
1050	116,34
1400	116,96
1750	117,49

#### 4.1.6. Pérdidas de energía hidráulica

##### 水力损失

El cálculo del salto útil requiere, además de los niveles de embalse y de restitución ya definidos, de la estimación de las pérdidas hidráulicas en la tubería, desde la toma en el embalse hasta la salida de la central, incluyendo la energía cinética a la salida del tubo de aspiración. Estas

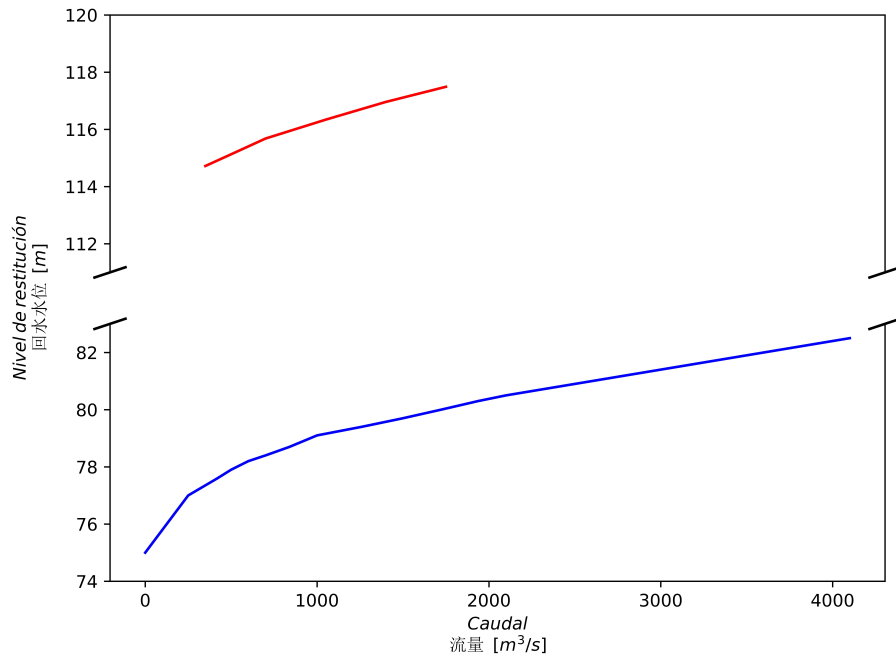


Figura 4.5: Leyes nivel de restitución versus caudal correspondientes a las presas NK (rojo) y JC (azul)

图 4.5: 尾水水位与流量关系，分别对应 NK 水坝（红色）和 JC 水坝（蓝色）

Tabla 4.4: Ley nivel de restitución versus caudal de la presa JC

表 4.4: JC 大坝的尾水水位与流量的关系

$Q$ [ $m^3/s$ ] 流量 [ $m^3/s$ ]	$N_{rest}$ [m] 回水水位 [m]
0	75,0
250	77,0
420	77,6
500	77,9
600	78,2
700	78,4
840	78,7
1000	79,1
1260	79,4
1500	79,7
1722	80,0
1937	80,3
2100	80,5
4100	82,5

pérdidas fueron estimadas en función de valores extraídos (Tablas 4.5 y 4.6) de sendos reportes técnicos (UTE, 2018; UTE, 2016) concernientes a las dos presas del río Santa Cruz.

有效水头的计算除了已确定的水库水位和尾水水位外，还需要估算从水库取水口到电站出口之间的水力损失，其中包括通过尾水管出口的动能损失。这些损失根据技术报告（UTE, 2018 ; UTE, 2016）中的数据进行估算，相关数据如表 4.5和表 4.6所示。

Tabla 4.5: Pérdidas de energía hidráulica de la presa NK

表 4.5: NK 水坝的水力能量损失

Pérdidas locales 局部损失		$K$	Área [m <sup>2</sup> ] 横截面 [m <sup>2</sup> ]	$J$ [m] ( $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 损失水头 [m] ( $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ )
Rejas	拦污杉	0,80	342,0	0,043
Embocadura	进水口	0,21	63,6	0,324
Codos (x2)	弯头	0,03	63,6	0,092
Recata	门槽	0,10	150,8	0,030
Tubo de aspiración	尾水管	1,00	150,8	0,300
Pérdida friccional 摩擦损失		$f$	$L$ [m]	$J$ [m]
Tubería forzada	压力钢管	0,008	66,3	0,09

Tabla 4.6: Pérdidas de energía hidráulica de la presa JC

表 4.6: JC 水坝的水力能量损失

Pérdidas locales 局部损失		$K$	Área [m <sup>2</sup> ] 横截面 [m <sup>2</sup> ]	$J$ [m] ( $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 损失水头 [m] ( $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ )
Rejas	拦污杉	0,14	420,0	0,005
Embocadura	进水口	0,10	315,3	0,006
Transición	过渡段	0,05	232,9	0,006
Recatas de ataguía	封堵门门槽	0,15	283,7	0,011
Recatas de compuertas	闸门门槽	0,15	236,4	0,300
Recata final	末端门槽	0,10	144,8	0,017
Tubo de aspiración	尾水管	1,00	144,8	0,298

Desarrollando la ecuación de pérdidas y considerando las distintas áreas que intervienen para cada sección, es posible integrarlas en una ley unificada (Ec. 4.1).

通过推导损失方程并考虑各个截面所涉及的区域，可以将其整合成一个统一的关系式 (方程式 4.1)

$$J = KQ_{turb}^2 \quad (4.1)$$

Donde, de acuerdo con la Ec. 3.21:

其中，根据 3.21 方程：

$$K = \frac{1}{2g} \left( \frac{fL}{DA^2} + \sum_i \frac{K_i}{A_i^2} \right)$$

Basados en los valores de las Tablas 4.5 y 4.6, respectivamente, los valores de  $K$  calculados resultan iguales a  $6,733E - 06 \text{ s}^2/\text{m}^5$  para la central NK y  $3,044E - 06 \text{ s}^2/\text{m}^5$ , para la presa JC.

根据表 4.5 和表 4.6 中的数据计算得到：NK 水电站的  $K$  值为  $6,733E - 06 \text{ s}^2/\text{m}^5$ ；JC 水坝的  $K$  值为  $3,044E - 06 \text{ s}^2/\text{m}^5$ .

#### 4.1.7. Diagramas de explotación de las turbinas

##### 水轮机运行图

La central NK estará equipada con 5 turbinas Francis cuyo diseño fue ensayado en modelos físicos en las instalaciones de Harbin Electrical Corporation, China. El diagrama colinar obtenido (Fig. 4.6) proyecta el rendimiento hidráulico en términos de  $P$  versus  $H_u$ . Como se ha dicho, el rendimiento integral,  $\eta_T$ , de la transformación energética comporta también el rendimiento mecánico (asociado con los cojinetes de la turbina),  $\eta_m$ , y el del generador adoptado,  $\eta_e$ , tales que  $\eta_m\eta_e = 0,9825$ .

NK 水电站将配备 5 台弗朗西斯（Francis）水轮机，其设计已在中国哈电集团的物理模型试验设施中进行测试。获得的等高性能图（图 4.6）展示了水头  $H_u$  与功率  $P$  之间的水力性能关系。如前所述，整体能量转换效率  $\eta_T$  还包括水轮机轴承的机械效率  $\eta_m$ （水轮机轴承）和所采用发电机的效率  $\eta_e$ ，其乘积为  $\eta_m\eta_e = 0.9825$ 。

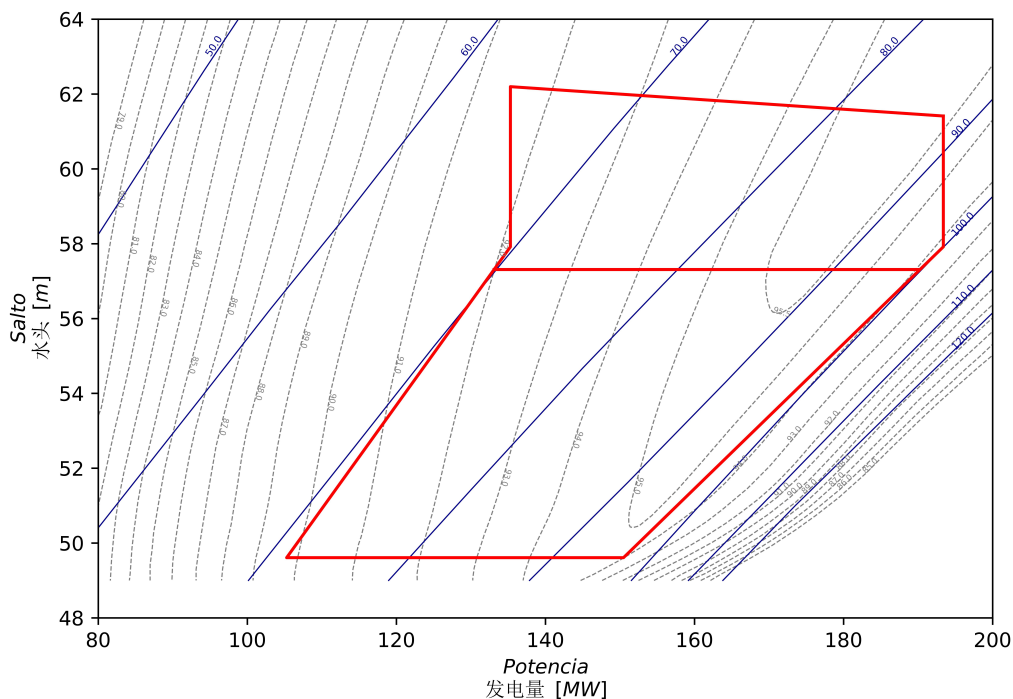


Figura 4.6: Diagrama colinar de las turbinas de la central NK, obtenido por ensayos en modelo físico (reproducido con autorización de Harbin Electrical Corporation, República Popular China)

图 4.6: NK 水电站水轮机等高性能图，数据源自中国哈电集团的物理模型试验

La central JC, por su parte, contará con 3 turbinas Kaplan. Su rendimiento fue aprobado en los ensayos testigos realizados en las instalaciones de ZheFu Tonglu, en China (Fig. 4.7). El conjunto de rendimiento mecánico y del generador adoptado es de  $\eta_m\eta_e = 0,9783$ .

JC 水电站则将安装 3 台卡普兰（Kaplan）水轮机，其性能已在中国浙富公司进行的模型试验中获得验证（图 4.7）。水轮机的机械效率与发电机效率的组合值为  $me = 0.9783$ 。

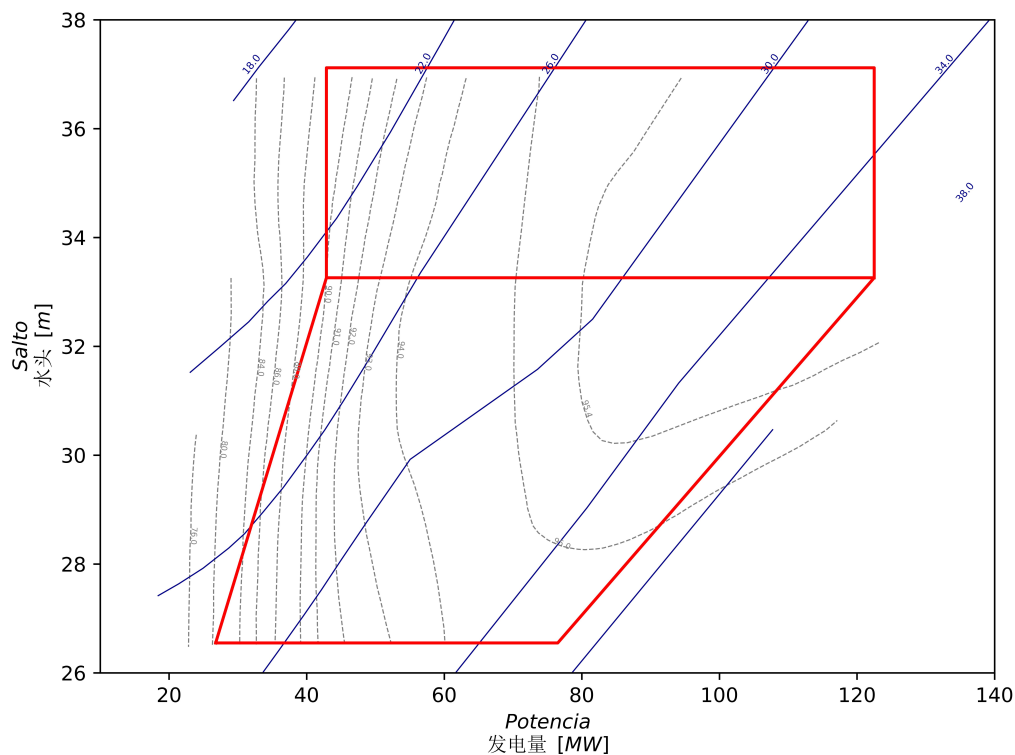


Figura 4.7: Diagrama colinar de las turbinas de la central JC, obtenido por ensayos en modelo físico (reproducido con autorización de ZheFu Tonglu, República Popular China)

图 4.7: JC 水电站水轮机等高性能图，数据源自中国浙富的物理模型试验

El rango de explotación de ambas centrales, que incorpora al análisis el número de turbinas instaladas, se ilustra por la superficie coloreada en la Fig. 4.8.

两座水电站的运行范围，结合所安装的水轮机数量，通过图 4.8中标记区域进行了说明。

## 4.2. Central NK: Hipótesis de simulación

### NK 水电站：模拟假设

Con el objeto de dar mayor estabilidad al sistema interconectado nacional, se plantean escenarios que apuntan a recrear simulaciones de los posibles (o más probables) esquemas de despacho de potencia y energía que puedan ser demandados a la central NK (Fig. 4.9). Consideraciones tales como el suministro de potencia en respaldo de la incorporación de nuevas fuentes de energía renovable (en un contexto en el que estas participan en cada vez mayor medida del parque energético) o la cobertura de eventuales emergencias puntuales que se manifiestan como picos de demanda, entre otros, hacen de estas simulaciones herramientas de suma utilidad para evaluar la respuesta de las centrales hidroeléctricas, tanto más cuanto más juicioso sea el diseño de los escenarios en cuestión.



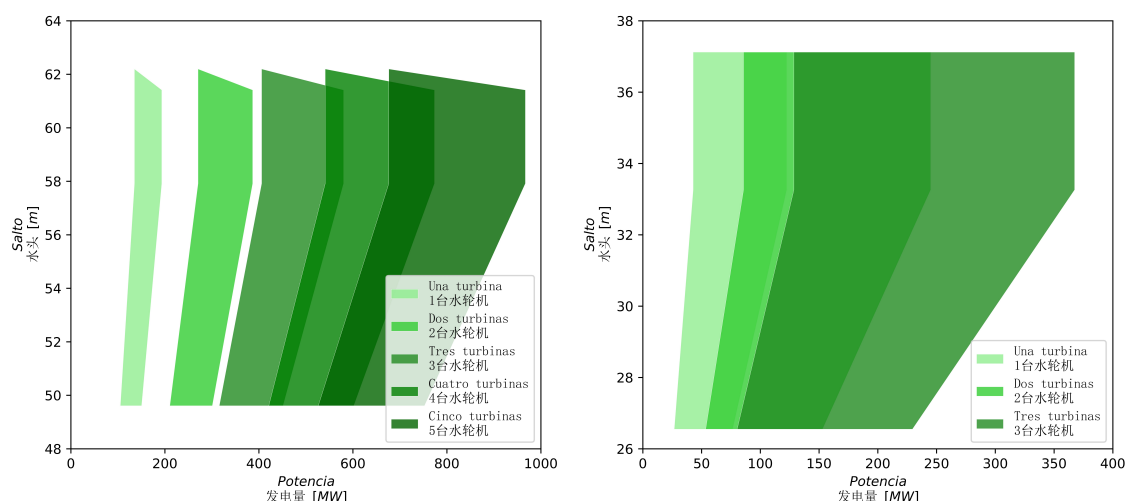


Figura 4.8: Rangos de explotación de las centrales NK (izq.) y JC (der.) para distintos números de turbinas activas. Las brechas entre las regiones de 1 y 2, y 2 y 3 turbinas activas en la central NK fuerzan una regulación intradiaria del embalse

图 4.8: NK (左) 和 JC (右) 水电站在不同水轮机运行数量下的运行范围。NK 水电站中 1 台与 2 台、2 台与 3 台水轮机运行范围之间的间隙要求水库进行日内调节

为提高国家电力互联系统的稳定性，设计了若干场景，以模拟 NK 水电站可能（或最有可能）出现的电力和能源调度方案需求（图 4.9）。诸如为新增可再生能源提供电力支持（在当前背景下，可再生能源在电力结构中的占比逐步提升），或应对突发紧急情况（如需求高峰期间的负载激增）等因素，使这些模拟成为评估水电站响应能力的极为有用的工具。这种工具的有效性与场景设计的合理性密切相关。

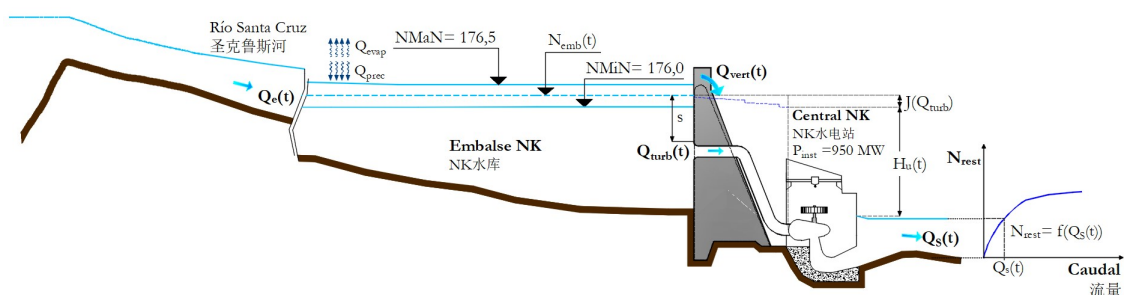


Figura 4.9: Esquema de la central hidroeléctrica NK

图 4.9: NK 水电站示意图

Estos escenarios procuran, asimismo, abarcar el mayor espectro de solicitudes a las que pueda estar expuesto el equipamiento hidroelectromecánico, de tal manera de servir también como parámetro adicional de diseño para los proveedores de las turbinas y demás componentes electromecánicos.

同时，这些场景还能最大限度地覆盖水电站机电设备可能面临的负载需求，进而为水轮机及其他电气设备供应商提供附加设计参数。

Al momento de establecer las condiciones de generación en el modelo de operación de embalse, se evaluaron tres escenarios posibles de operar a lo largo de su vida útil, dependiendo de las necesidades de las líneas eléctricas y/o el sistema interconectado; todas ellas llevan a decisiones

en las consignas de operación que se plantean a continuación.

在制定水库运行模型的发电条件时，针对电网和互联系统的需求，评估了三种可能的运行场景，这些场景将在水电站全生命周期内可能出现，并对运行设置决策起到指导作用。这些运行设置的具体内容将在以下部分详细说明。

**Escenario 1 (de máximo empuntamiento):**

场景 1（最大峰值运行）

La energía diaria se entrega en términos de la potencia instalada generada constantemente a lo largo de lapsos fijos (en función del factor de utilización elegido) bajo condiciones normales de operación (Fig. 4.10). Durante periodos de excedencia (Fig. 4.11), los lapsos de generación pueden expandirse hasta abarcar las 24 horas del día, es decir, que el factor de utilización puede equivaler a la unidad. Durante periodos de estiaje (Fig. 4.12), en cambio, se prevé que el factor de utilización pueda reducirse hasta 0,25; si, aun en tales condiciones, el caudal es insuficiente para generar la potencia instalada, entonces las turbinas lo asimilarán aún gracias al cierre del distribuidor y, eventualmente, se apagarán de manera sucesiva.

每日发电以固定时段内持续输出的安装功率为基础进行分配（取决于选定的利用系数），并在正常运行条件下进行（如图 4.10 所示）。在汛期（如图 4.11 所示），发电时段可能扩展至全天 24 小时，即利用系数可达 1。而在枯水期（如图 4.12 所示），利用系数可能降至 0.25；若即便如此，流量仍不足以满足安装功率需求，则水轮机将在关闭导水机构的情况下逐步停止运行，并最终依次关闭。

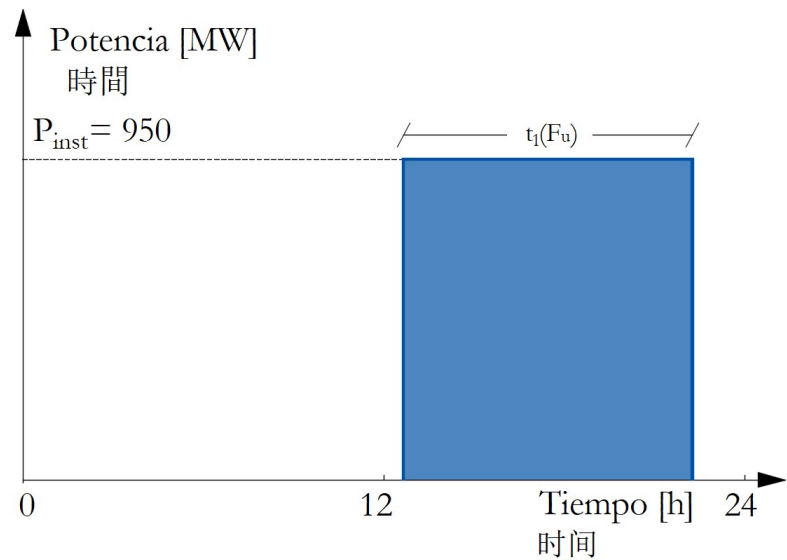


Figura 4.10: Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 1 bajo condiciones normales de operación. La central provee la potencia instalada durante un cierto periodo del día

图 4.10: 在正常运行条件下，对应场景 1 的日间发电功率图。电站在一天的特定时段内输出安装功率

**Escenario 2:**

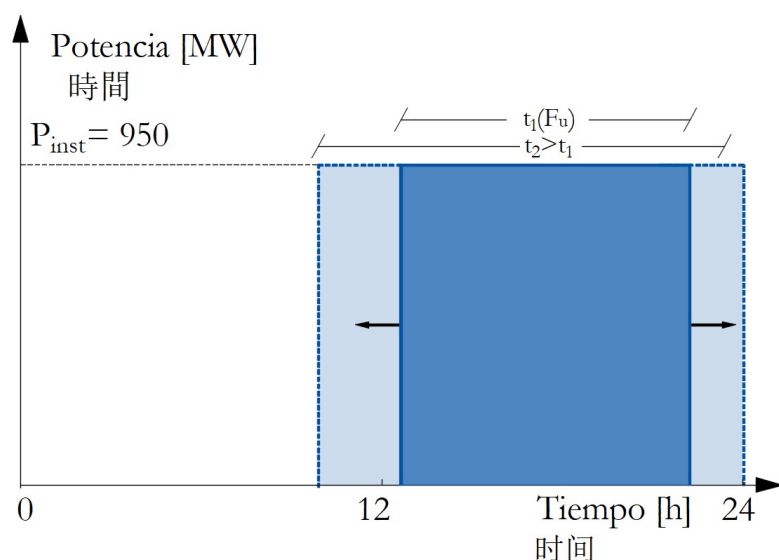


Figura 4.11: Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 1 bajo condiciones de excedencia. La central es capaz de proveer la potencia instalada durante periodos más prolongados respecto del propio de condiciones normales de operación

图 4.11: 汛期条件下对应场景 1 的每日功率生成图。与正常运行条件相比，电站能够在更长的时间段内提供装机功率

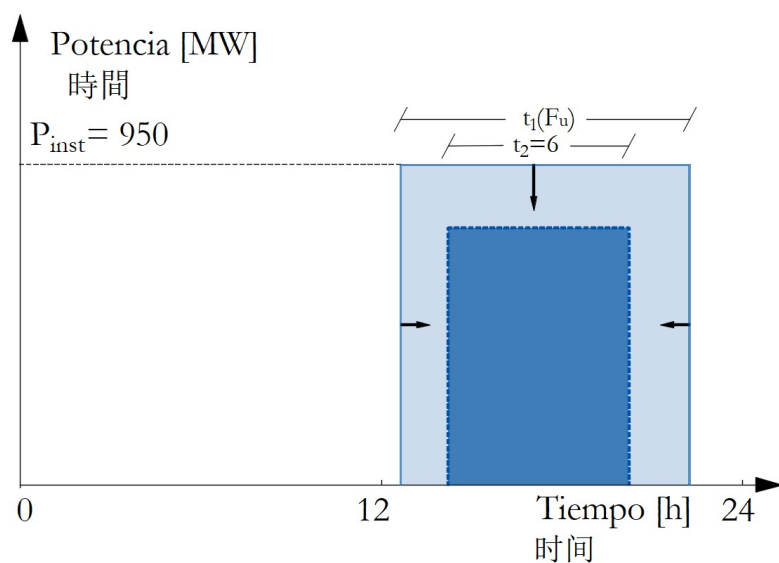


Figura 4.12: Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 1 bajo condiciones de falla. La central se ve imposibilitada de proveer la potencia instalada durante el lapso propio de condiciones normales de operación, por lo cual el tiempo de generación se torna más exíguo hasta que el factor de utilización iguala a 0,25. La ulterior reducción de la generación se produce, primero, a expensas del cierre del distribuidor de las turbinas y, luego, del apagado sucesivo de estas

图 4.12: 故障条件下对应场景 1 的每日功率生成图。在正常运行条件下，电站无法提供装机功率，因此发电时间缩短，直到利用系数降至 0.25。进一步的发电量减少首先通过关闭水轮机导水机构实现，随后逐步关闭水轮机

## 场景 2

Este escenario propone una operación mixta durante el día, demandando (tal como en el Escenario 1) la potencia instalada a lo largo de una cierta fracción del día, en tanto que el resto del tiempo se brinda una potencia mínima que, en este caso particular, corresponde a la que

puede generar una turbina al 70 % de su capacidad (Fig. 4.13). Responde a la necesidad de, por un lado, cubrir los picos de demanda eléctrica, al igual que el Escenario 1; y, por otro lado, de garantizar la estabilidad del Sistema Interconectado Nacional (máxime teniendo en cuenta que la central NK se halla en el extremo de la línea), lo cual requiere de un despacho continuo de potencia. Las situaciones excepcionales (excedencia o falla) se resuelven de modo análogo al Escenario 1.

该场景建议在一天内进行混合操作，与场景 1 类似，在一天的一定时间内满足装机功率需求，而其余时间则提供最低功率输出，在此特定情况下，这一最低功率相当于单台水轮机以 70 % 负荷运行所能产生的电力（图 4.13）。这一方案既满足了覆盖电力需求高峰的需要（如场景 1 所述），同时又保证了国家电网的稳定性（特别是考虑到 NK 水电站位于电网末端），因此需要持续输出功率。特殊情况（如汛期或故障）则与场景 1 的处理方式类似。

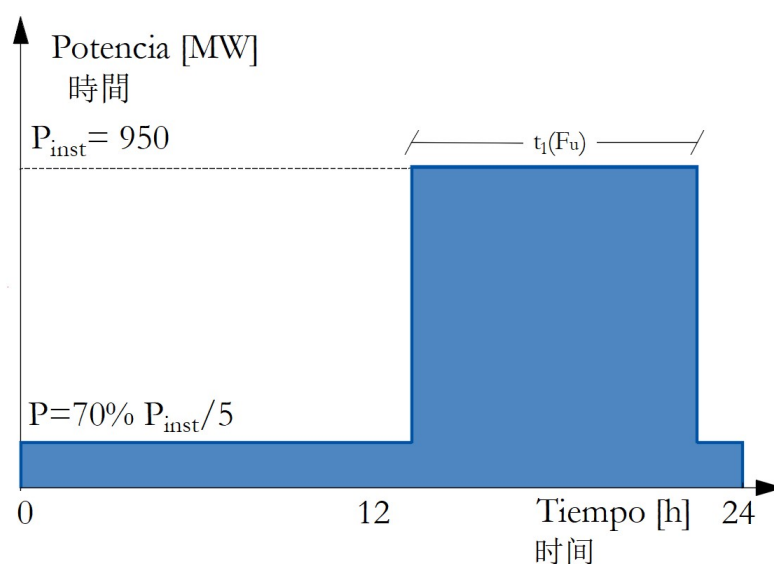


Figura 4.13: Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 2 bajo condiciones normales de operación. La central provee la potencia instalada durante un cierto periodo del día y una potencia mínima durante el tiempo remanente

图 4.13: 在正常运行条件下，场景 2 的每日发电功率图。电站在一天中的某段时间内提供装机功率，其余时间提供最小功率

### Escenario 3 (de operación de base):

场景 3（基础运行场景）

Este escenario propone generar todo el tiempo el caudal disponible ingresante, aun a escala horaria (Fig. 4.14). A consecuencia de ello, la potencia generada varía constantemente, según la disponibilidad hídrica, en un rango que se extiende desde un mínimo equivalente al 70 % de la potencia nominal de una turbina a un máximo igual a la potencia instalada.

该场景建议始终按照流入的可用流量进行发电，即使是按小时算（图 4.14）。因此，发电功率会根据水资源的可用性不断变化，其范围从最低值（一台水轮机额定功率的 70 %）到最高值（装机功率）。

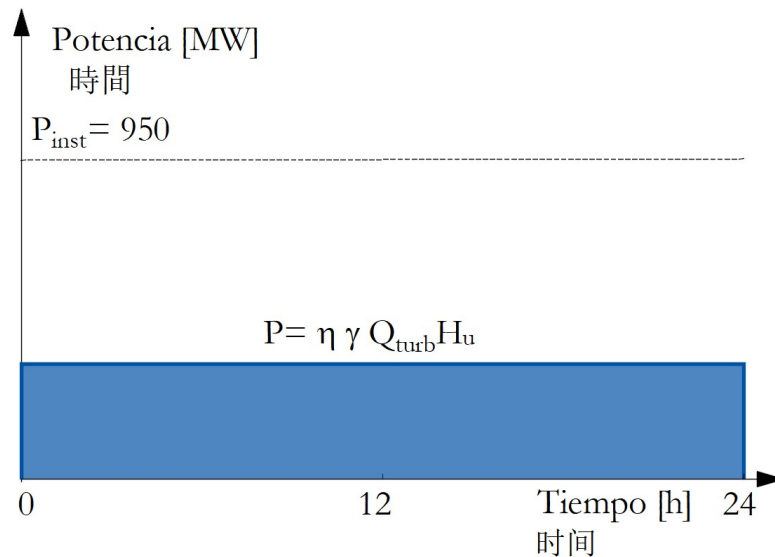


Figura 4.14: Diagrama de generación de potencia a lo largo del día correspondiente al Escenario 3 bajo condiciones de normales de operación. La central opera cual si no tuviera capacidad de regulación, de tal manera que la potencia generada corresponde al caudal que fluye a través del río

图 4.14: 在正常运行条件下，场景 3 的每日发电功率图。电站的运行就像没有调节能力一样，因此发电功率对应于通过河流的流量

### 4.3. Central NK: Resultados

#### NK 水电站：结果

A la luz de los resultados de la simulación del modelo de embalse, la potencia media diaria generada por la central NK (Fig. 4.15) replicaría en buena medida el régimen natural del río Santa Cruz (Fig. 4.2) asumiendo un factor de utilización  $F_u = 0,41$ . Asimismo, a causa del exiguo volumen de regulación, el movimiento de embalse exhibiría una continua alternancia de frecuencia anual entre los niveles máximo y mínimo normales.

根据水库模型模拟的结果，假设利用系数为  $F_u = 0,41$ ，NK 水电站的日均发电功率（图 4.15）在很大程度上会反应圣克鲁斯河的天然流量规律（图 4.2）。此外，由于调节能力有限，水库水位将在正常的最高和最低水位之间以年周期频繁波动。

En efecto, durante un año típico, el nivel del embalse se estacionaría en el máximo normal durante los meses ricos de la primera mitad del año, para declinar y establecerse en el mínimo normal durante la segunda mitad (Fig. 4.16)

具体而言，在一般年份中，水库水位将在上半年汛期保持在正常最高水位，并在下半年下降至正常最低水位（图 4.16）。

En contraste, durante un año tal como el extraordinariamente seco de 1971 (a entre aproximadamente 4400 y 4800 días del inicio de la serie, Fig. 4.15), el nivel del embalse no se elevaría durante ningún momento respecto del mínimo normal (Fig. 4.17), en detrimento de la generación de energía.

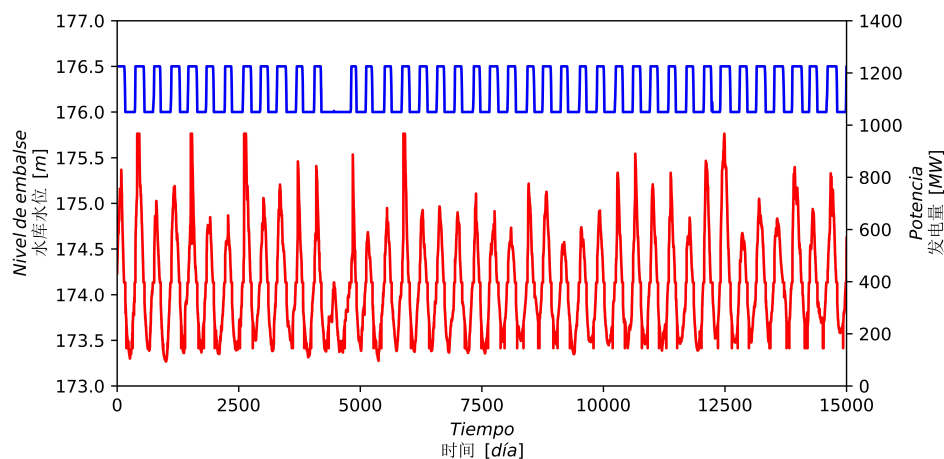


Figura 4.15: Movimiento del embalse (en azul) y generación de potencia media diaria (en rojo) a lo largo del periodo analizado considerando las condiciones de operación correspondientes al Escenario 1

图 4.15: 水库变化（蓝色）与日均发电功率（红色）随分析期间的变化趋势（基于场景 1 的运行条件）

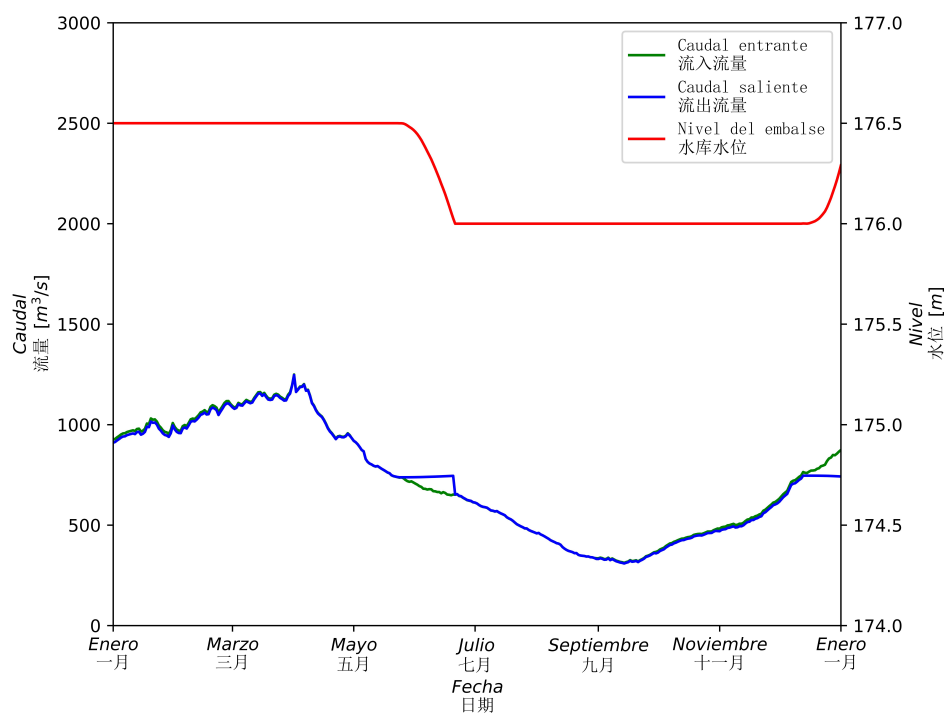


Figura 4.16: Movimiento del embalse y balance de caudales durante un año medio (1996)

图 4.16: 1996 年平均年份中水库变化与流量平衡

在异常干旱的年份（如 1971 年，约为系列开始后的第 4400 到 4800 天，见图 4.15）中，水库水位在任何时候都不会高于最低正常水位（图 4.17），这将对能源生产造成不利影响。

No es esperable, sin embargo, que el nivel del embalse permanezca a la altura del máximo normal durante todo un año aun en uno tal como el 2013 (a entre aproximadamente 13900 y 14300 días del inicio de la serie, Fig. 4.15), uno de los más húmedo de la serie, en virtud de la pobre capacidad de regulación de caudal, que le impide almacenar los excedentes de agua durante los meses ricos. En lugar de ello, el descenso del nivel se demora hasta entrada la

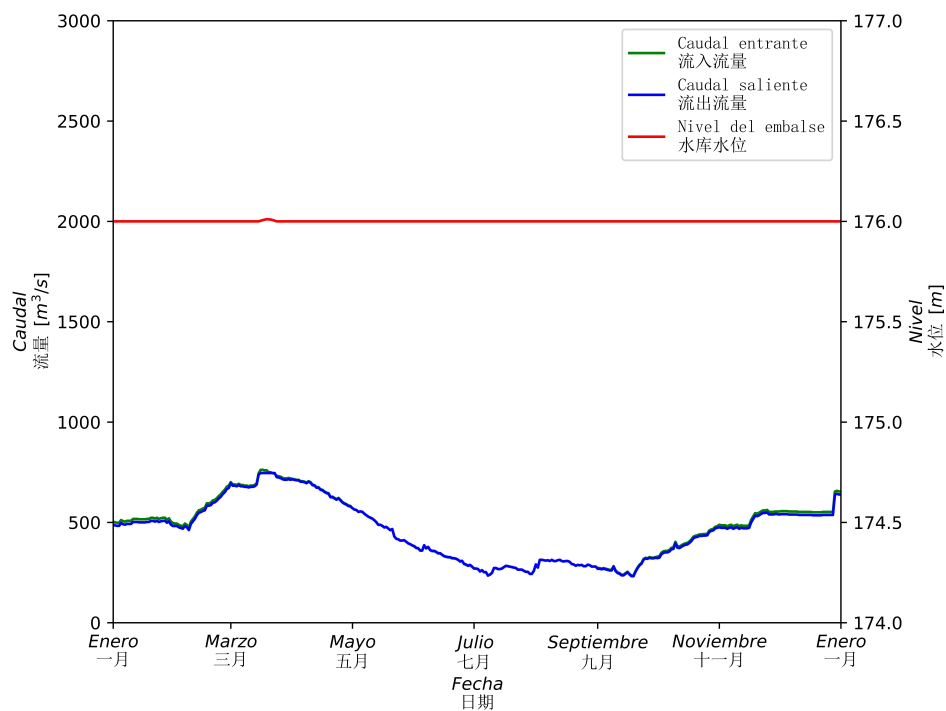


Figura 4.17: Movimiento del embalse y balance de caudales durante un año seco (1971)

图 4.17: 干旱年份（1971 年）期间水库水位变化和流量平衡

segunda mitad del año (Fig. 4.18).

然而，即使在如 2013 年这样异常丰水的年份（约为系列开始后的第 13900 到 14300 天，见图 4.15），水库水位也不太可能全年保持在最高正常水位。由于水库的调节能力有限，无法在丰水期储存多余的水量。相反，水位的下降会推迟到下半年（图 4.18）。

Los resultados de la simulación del Escenario 2 exhiben un patrón de comportamiento del todo análogo (Fig. 4.19), asumiendo un factor de utilización  $F_u = 0,34$ .

在假设利用系数为  $F_u = 0.34$  的情况下，场景 2 的模拟结果显示出完全类似的行为模式（图 4.19）

La generación de la potencia media diaria que resultan de la simulación del Escenario 3 (Fig. 4.20), por su parte, guarda una semejanza mucho más marcada con la serie hidrológica (Fig. 4.2), lo cual es lógico, en razón de la nula capacidad de regulación de caudal del embalse — obsérvese que el nivel del embalse permanece inalterado durante toda la duración del periodo simulado—.

另一方面，场景 3 的模拟结果（图 4.20）中每日平均发电量与水文序列（图 4.2）之间的相似性更为显著，这在逻辑上是合理的，因为水库完全没有流量调节能力——可以观察到，在整个模拟期间，水库水位都是保持不变的。

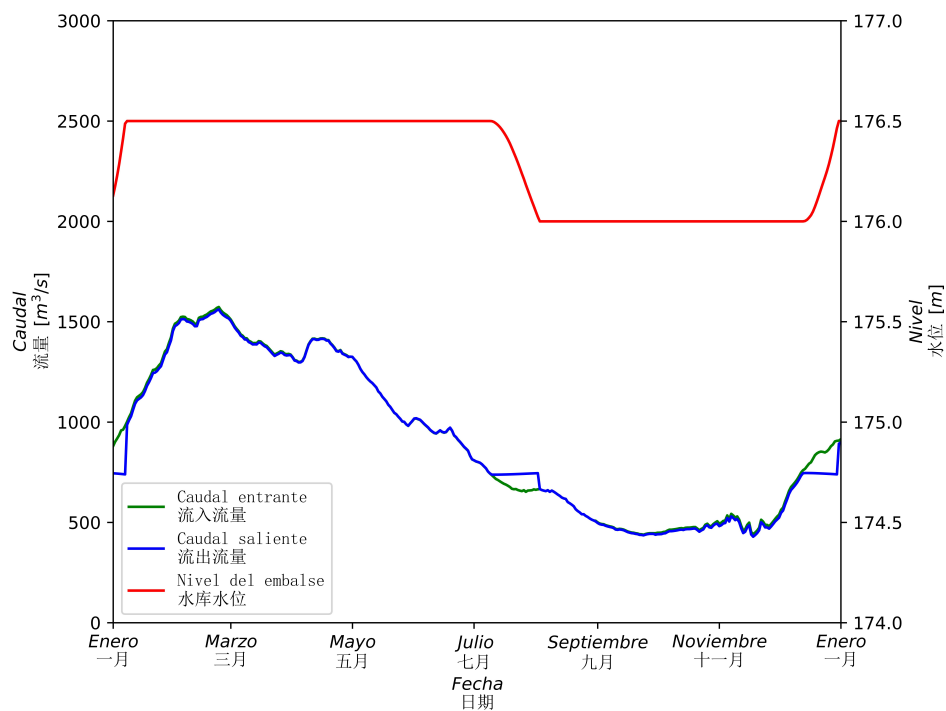


Figura 4.18: Movimiento del embalse y balance de caudales durante un año húmedo (2013)

图 4.18: (2013 年) 期间水库水位变化和流量平衡

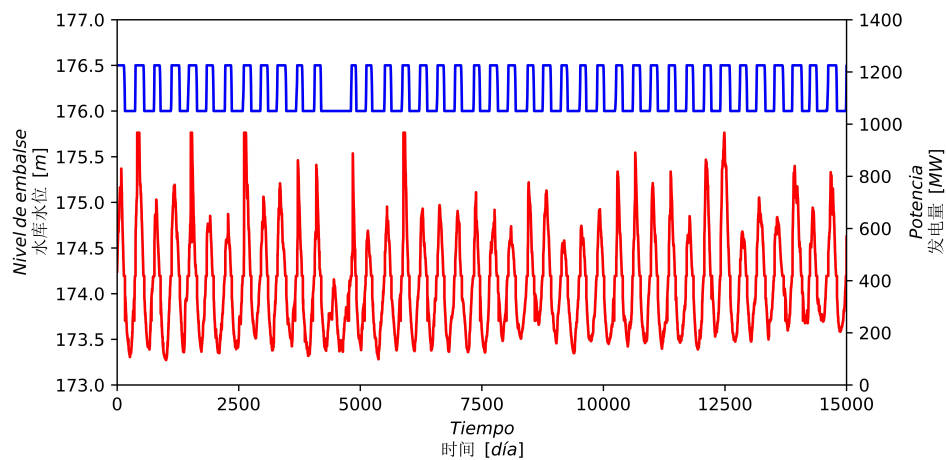


Figura 4.19: Movimiento del embalse (en azul) y generación de potencia media diaria (en rojo) a lo largo del periodo analizado considerando las condiciones de operación correspondientes al Escenario 2

图 4.19: 在分析周期内，基于场景 2 的运行条件，水库的水位变化（蓝色）与每日平均发电量（红色）

### 4.3.1. Matrices de operación

#### 运行矩阵

Hasta aquí, los resultados de las simulaciones se han dispuesto en términos de la evolución de variables significativas (las medias diarias de niveles de embalse, del caudal y de la potencia generada) a lo largo de la duración de la serie analizada. Sin embargo, puede derivarse información adicional por integración de esas variables en la extensión de ese mismo periodo, de tal manera



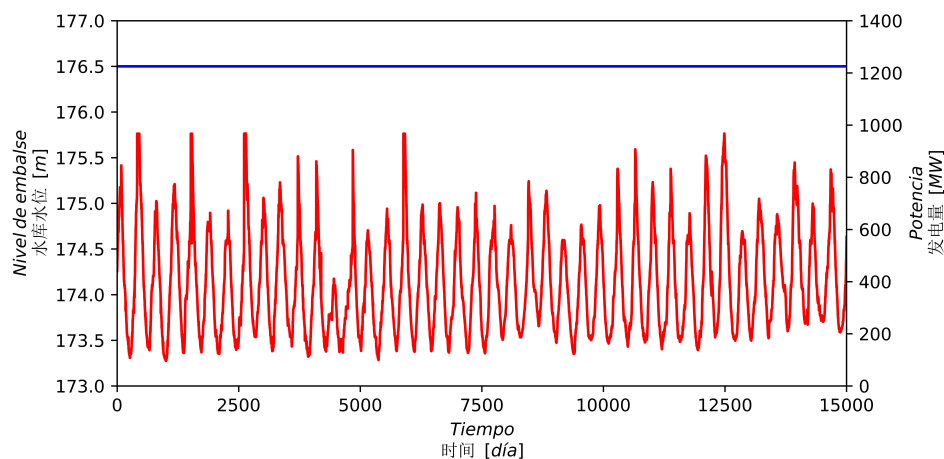


Figura 4.20: Movimiento del embalse (en azul) y generación de potencia media diaria (en rojo) a lo largo del periodo analizado considerando las condiciones de operación correspondientes al Escenario 3

图 4.20: 在分析周期内，基于场景 3 的运行条件，水库的水位变化（蓝色）与每日平均发电量（红色）

que pueda disponerse en función de las variables que enmarcan los diagramas de explotación de las turbinas.

到目前为止，模拟结果以分析时间序列中的关键变量（如水库水位、流量和发电量的每日平均值）的演变形式呈现。然而，通过将这些变量整合到相同时间范围内，并与水轮机运行图表中的变量相关联，可以获得额外的信息。

En efecto, se dan tantas combinaciones de salto, caudal y potencia generada como instantes se contemplen en la discretización del lapso simulado. Estas combinaciones definen un espacio que, idealmente, debería solaparse a la región de operación óptima de las turbinas (Fig. 4.6 y Fig. 4.7). En tal caso, una tercera dimensión se pone en evidencia, a saber, la frecuencia con la que estas combinaciones se dan a lo largo de la simulación. La visualización de la frecuencia de las condiciones de operación se conoce como matriz de operación y permite vincular dos planos bien distinguidos: los concernientes al aprovechamiento hídrico y al rendimiento de las turbinas, respectivamente. En este contexto, se asume que la frecuencia refiere al tiempo que cada una de las turbinas opera en condiciones dadas; es decir, que contempla implícitamente el factor de utilización y la alternancia de las puestas en funcionamiento de las distintas unidades.

实际上，在模拟时段的离散化过程中，水头、水流量和发电量的组合数量与时间点的数量一致。这些组合定义了一个空间，该空间理想情况下应该与水轮机的最佳运行区域重叠（参见图 4.6 和图 4.7）。在此基础上，揭示了一个第三维度，即这些组合在模拟期间出现的频率。运行条件频率的可视化称为运行矩阵，能够将两个截然不同的维度联系起来：一是与水资源利用相关，二是与水轮机性能相关。在这一背景下，频率指代每台水轮机在特定运行条件下运转的时间，这隐含了利用系数以及不同机组交替启用的情况。

Tal como permiten prever las consideraciones de las secciones anteriores, la selección de las consignas de operación tiene repercusiones que exceden la mera cantidad de energía generada: refleja también la clase de solicitudes a las que se encuentran sometidas las turbinas.

正如前文各节中所预见的，运行指令的选择不仅影响发电量的大小，还决定了水轮机所承受的负荷类型。

Las consignas de operación que definen el Escenario 1, por ejemplo, resultan en que las turbinas generan su máxima potencia la mayor parte del tiempo en que se encuentran encendidas, lo cual se plasma en un corrimiento hacia la derecha de la región de explotación (Fig. 4.21). En efecto, las condiciones de operación que se dan con mayor frecuencia se encuentran en el entorno de una potencia  $P_{gen} = 190$  MW y un salto útil del orden de  $H_u = 58$  m (máxima frecuencia 58,76 %).

例如，场景 1 所定义的给定值导致水轮机在启用时大部分时间以最大功率运行。这体现在运行区域向右移动（见图 4.21）。实际上，出现频率最高的运行条件集中在发电功率  $P_{gen} = 190$  MW 和有效水头  $H_u = 58$  m 附近，其中最大频率为 58.76 %。

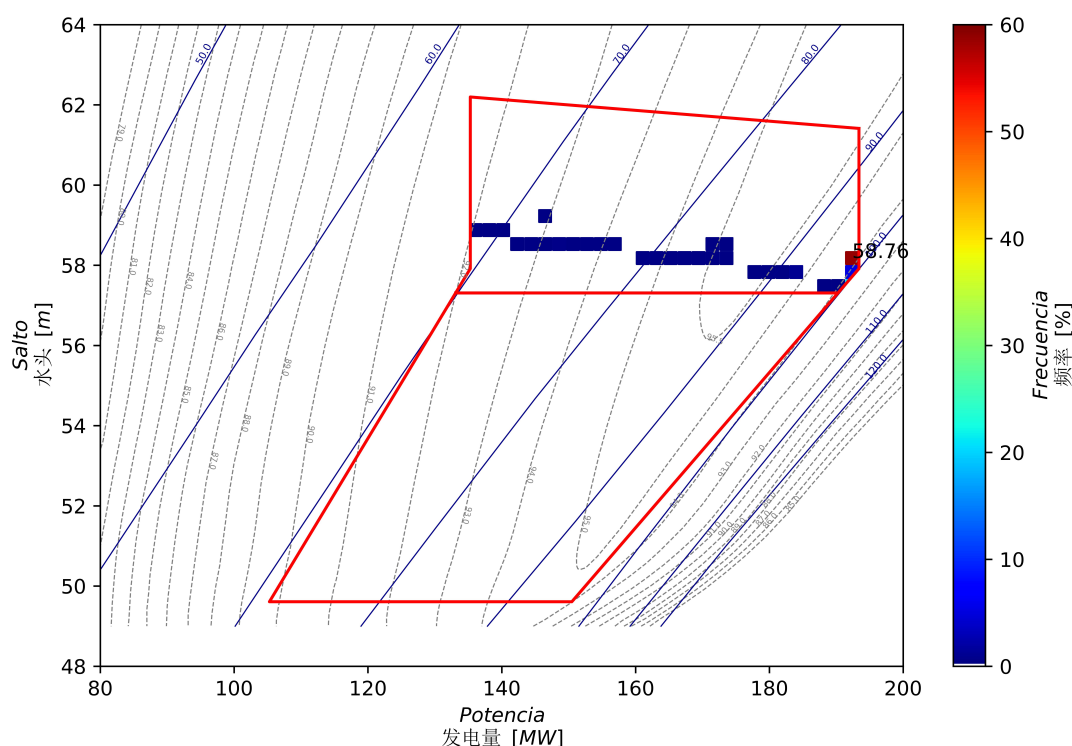


Figura 4.21: Matriz de operación de las turbinas de la presa NK correspondiente al Escenario 1

图 4.21: 对应场景 1 的 NK 水坝水轮机操作矩阵

Por su parte, la matriz de operación correspondiente al Escenario 2 (Fig. 4.22) exhibe dos picos bien definidos (frecuencias de 18,91 % y 45,79 %), asociados a sus dos modalidades de operación: la generación de potencia de base (mínima potencia, altos saltos y alternancia del encendido de las turbinas), por un lado; y la generación de potencia de punta, signada por máximas potencias y bajos saltos, análogamente al Escenario 1.

对应场景 2 的操作矩阵（图 4.22）展示了两个明显的峰值（频率分别为 18.91 % 和 45.79 %），分别与其两种操作模式相关：一方面是基础发电（最小功率、高水头和水轮机启停交替）；另一方面是峰值发电，表现为最大功率和低水头，类似于场景 1。

Por último, las consignas de operación correspondientes al Escenario 3, que involucran la genera-

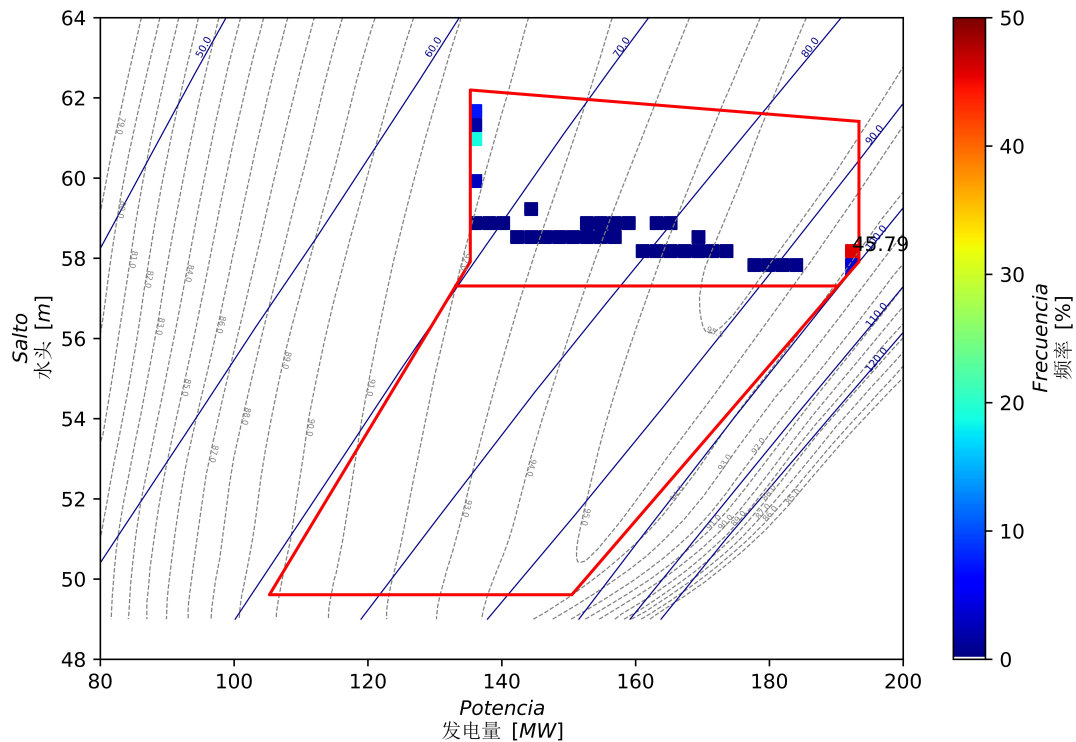


Figura 4.22: Matriz de operación de las turbinas de la presa NK correspondiente al Escenario 2

图 4.22: 对应场景 2 的 NK 水坝水轮机操作矩阵

ción de potencia de base, mínima regulación de caudales y nivel del embalse permanentemente establecido a la altura del máximo normal, redundan en la mayor preponderancia de condiciones de explotación de altos saltos y valores modestos de caudal (y de potencia generada). Todo ello explica la moderada concentración de la frecuencia, con un máximo de 13,65 %, hacia el extremo superior izquierdo del espectro, visible en la matriz de operación (Fig. 4.23). Ello no obstante, un rasgo distintivo de este escenario es la dispersión de las condiciones de operación sobre toda la región de explotación.

最后，场景 3 的给定值涉及基础功率的生成、最小流量调节以及水库水位始终保持在正常最大高度，这导致了高水头和较低流量（以及生成功率）操作条件的主导地位。这解释了频率的适度集中，最高为 13.65%，并出现在操作矩阵（图 4.23）的光谱左上角。然而，这一场景的一个显著特征是操作条件在整个操作区域的分布。

### 4.3.2. Factor de planta

#### 运行系数

Las consignas de operación diaria que definen cada uno de los escenarios propuestos quedan supeditados, durante la vida útil de la central hidroeléctrica, a la disponibilidad hídrica propia del río. Por tal razón, los tiempos de operación, igual que la energía total generada, en un día dado pueden variar según el caudal que fluye por el río. El factor de planta, por oposición al factor de utilización, refleja las condiciones posibles de operación frente a las ideales. Se define como el

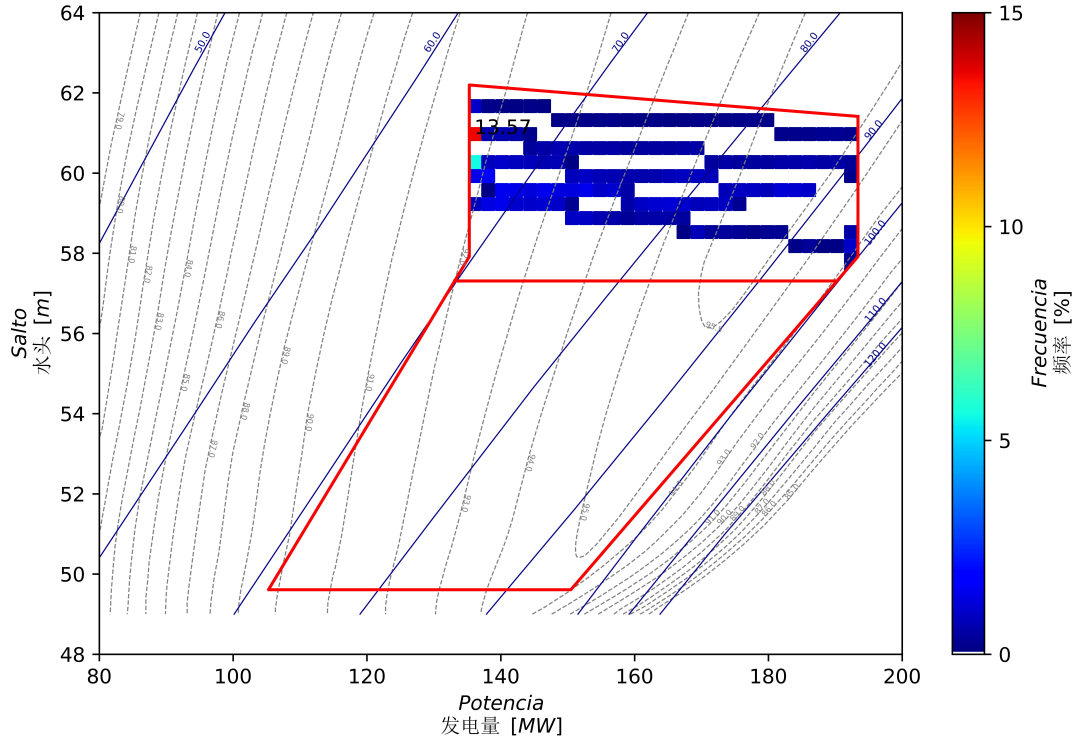


Figura 4.23: Matriz de operación de las turbinas de la presa NK correspondiente al Escenario 3

图 4.23: NK 水坝水轮机对应场景 3 的运行矩阵

cociente entre la energía generada realmente por la central durante un día respecto de la que se podría generar operando a máxima potencia en todo momento (Ec. 4.2). Es fácil comprobar que, para el Escenario 1, el factor de planta es congruente con el factor de utilización.

每个场景所定义的日常给定值，在水电站的使用寿命期间，取决于河流本身的水资源可用性。因此，运行时间与某一天的总发电量可能会根据河流流量的变化而不同。运行系数（因子）与利用系数相对，反映了实际运行条件与理想条件的对比关系。其定义为电站在某一日内实际发电量与始终以最大功率运行时可能产生的发电量的比值（公式 4.2）。可以简单验证，对于场景 1，运行系数与利用系数一致。

$$F_P = \frac{1}{P_{inst}T} \int^T P_{gen} dt \quad (4.2)$$

El factor de planta, así definido, resulta, para los escenarios ensayados:

按照上述定义，针对试验的场景，运行系数（ $F_P$ ）的结果如下：

- Escenario 1:  $F_P = 0,406$ ;  
场景 1 :  $F_P = 0.406$ ;
- Escenario 2:  $F_P = 0,409$ ;  
场景 2 :  $F_P = 0.409$ ;
- Escenario 3:  $F_P = 0,416$ .

场景 3 :  $F_P = 0.416$ 。

### 4.3.3. Curvas de duración

#### 持续曲线

La así llamada curva de duración es una forma usual de evaluar la producción de una central hidroeléctrica bajo condiciones de operación dadas. Consiste en la representación de la potencia generada por la central, en orden decreciente de magnitud, en función del porcentaje del tiempo de la simulación. En otras palabras, la curva de duración denota la potencia generada en función de la proporción del tiempo en que esta es igualada o excedida.

所谓的持续曲线是评估水电站在给定运行条件下生产能力的一种常见方法。其内容是将电站所产生的功率按从大到小的顺序绘制，并与模拟时间的百分比对应。换句话说，持续曲线表示功率与功率被达到或超出的时间比例之间的关系。

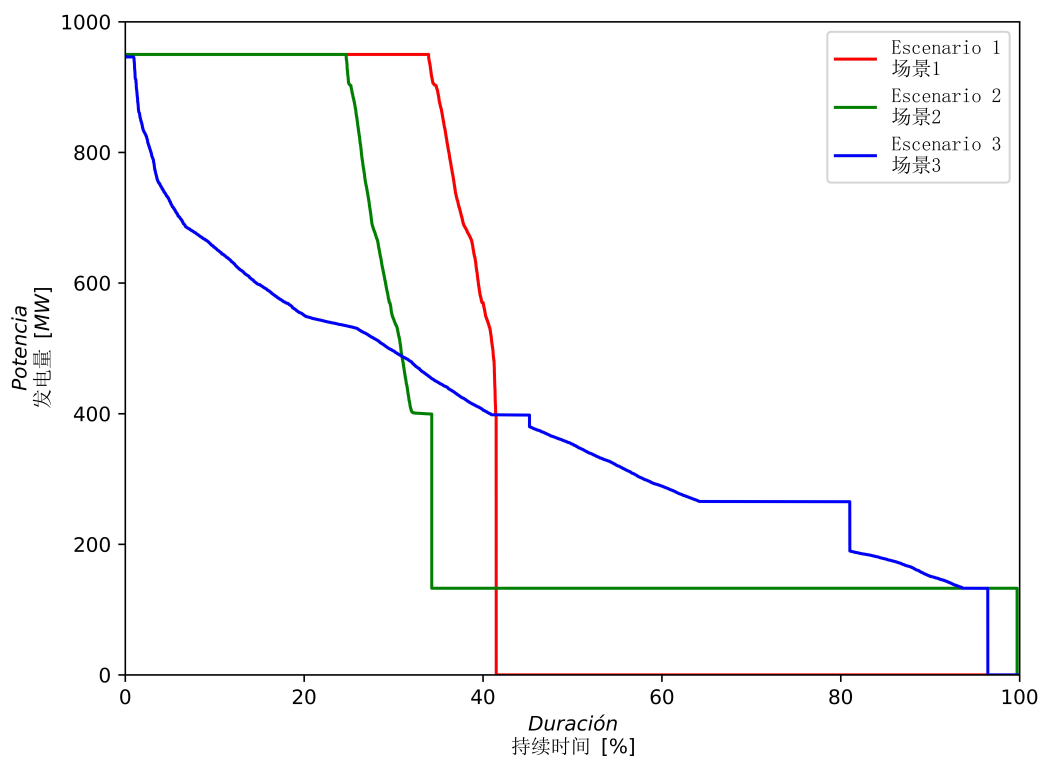


Figura 4.24: Curvas de duración correspondientes a los tres escenarios analizados

图 4.24: 对应于分析的三个场景的持续曲线

Los tres escenarios ensayados para la operación de la central NK producen sendas curvas de duración (Fig. 4.24). La variable en el eje de ordenadas denota, en este caso, la potencia media horaria. Puede observarse que, de acuerdo con la curva correspondiente al Escenario 1, la potencia instalada se genera durante algo menos que el 40 % del tiempo de la simulación. Tal como era esperable, la intersección de la curva con el eje de abscisas es congruente con el factor de

utilización obtenido,  $F_u = 0,41$ . Análogamente, la curva de duración correspondiente al Escenario 2 tiene un punto de inflexión en coincidencia con una duración del 34 %, que denota el cambio de modalidades de operación: empuntada y de base.

NK 电站运行的三个测试场景生成了各自的持续曲线（图 4.24）。纵轴的变量表示每小时的平均功率。从图中可以看出，根据场景 1 的持续曲线，安装功率在模拟时间的不到 40 % 中得以实现。如预期那样，曲线与横轴的交点与计算得出的利用系数  $F_u = 0.41$  相符。同样，场景 2 的持续曲线在持续时间为 34 % 时出现一个拐点，表明两种运行模式（尖峰模式与基荷模式）的转换。

Por último, la curva propia del Escenario 3 es suavemente declinante en virtud de que la potencia generada en cada instante responde al caudal proveniente del río. Obsérvese que no hay dos valores de potencia iguales, salvo por un par de mesetas, que resultan de los periodos de regulación intradiaria mencionados en la Sección 3.3.2 en coincidencia con las brechas en el espectro de explotación cuando la operación involucra menos de tres turbinas las condiciones hidrológicas son tales que requieren del apagado de una unidad. Los valores nulos de potencia obtenidos, sobre el extremo derecho de la curva, responden a que los valores de potencia empleados para la construcción del diagrama son, vale insistir, medios horarios: hubo días, durante la simulación, en que las turbinas estuvieron apagadas por algunas horas, en coincidencia con días de caudales extremadamente bajos.

最后，场景 3 的持续曲线呈现平缓下降趋势，这是因为在每个时间点生成的功率取决于河流的流量。可以观察到，功率值没有重复，除了少数平台，这是由于第 3.3.2 节中提到的日内调节期间产生的，且与当运行涉及少于三台水轮机时的运行频谱空隙相一致，当水文条件要求关闭其中一台水轮机时，便会出现这种情况。功率曲线右端的零值则是因为用来构建图表的功率值是按每小时的平均值计算的：在模拟期间，某些天由于极低的流量，水轮机会在某些时段停止运行，从而导致部分小时的功率为零。

#### 4.3.4. Energía media anual

##### 年均能量

El volumen de energía obtenido para cada uno de los escenarios, calculado según la formulación proporcionada por la Ec. 3.4, fue:

根据公式 3.4 提供的计算方法，每个场景的能量量值为：

- Escenario 1:  $EMA = 3376$  GWh/año;  
场景 1 = 3376 GWh/年；
- Escenario 2:  $EMA = 3403$  GWh/año;  
场景 2 = 3403 GWh/年；
- Escenario 3:  $EMA = 3465$  GWh/año.  
场景 3 = 3465 GWh/年。

Los resultados son previsibles en el sentido de que, por su propia definición, el Escenario 3 hace el óptimo aprovechamiento del río, al transformar íntegramente la potencia hidráulica de que este dispone. Por el contrario, el Escenario 1, en virtud de su inflexibilidad, es el que arroja los más pobres resultados. Por último, la generación de potencia de semi-base que es propia del Escenario 2, configura una situación intermedia entre ambos extremos, lo mismo que la magnitud de la energía extraída.

这些结果是可以预期的，因为根据其定义，场景 3 最有效地利用了河流，将其可用的水能完全转化为电能。相反，由于场景 1 操作的灵活性较差，产生的结果最为不理想。而场景 2 的半基荷功率生产则在两个极端之间，这也反映在发电量上。

Desde luego, estos valores, si bien relevantes, quedan supeditados a los requerimientos reales de las centrales hidroeléctricas en cuestión y al fin último que persiguen en relación con la demanda del sistema interconectado.

当然，这些数值尽管重要，但仍需取决于具体水电站的实际需求以及其在满足互联电网系统需求中的最终目标。

## 4.4. Central JC: Hipótesis de simulación

### JC 水电站：模拟假设

Si bien la central JC (esquemática en la Fig. 4.25) está capacitada para hacer las veces de un embalse compensador que atenúe las fluctuaciones del caudal vertidos hacia aguas abajo por la central NK, su funcionamiento como unidad independiente reviste interés en virtud de que entrará en operación con anterioridad a aquella. Esta es, al menos, la hipótesis más probable al momento en que se redacta esta publicación.

尽管 JC 水电站（如图 4.25 所示）具备作为调节水库的能力，可减缓 NK 水电站向下游排放流量的波动，但其作为独立单元运行仍然具有重要意义，因为它将早于 NK 水电站投入运行。这至少是撰写本出版物时最可能的假设。

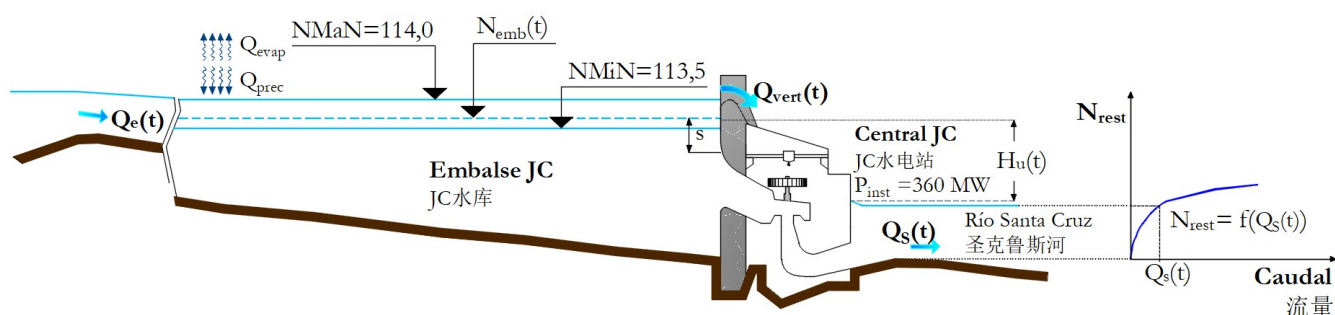


Figura 4.25: Esquema de la central hidroeléctrica JC

图 4.25: JC 水电站示意图

El esquema de despacho de potencia de la central JC es análogo al del Escenario 3 planteado



para la central NK, en el sentido de que la potencia generada es producto de turbinar todo el caudal ingresante al embalse (Fig. 4.26), en la medida en que esto sea posible. Es por tal razón que se realizó una simulación del modelo de embalse de la central JC contemplando, como una de las condiciones de contorno, la serie hidrológica del río Santa Cruz tal como fuera registrada en la estación Charles Fuhr; es decir, cual si el río no estuviera intervenido aguas arriba (se la referirá de aquí en más como Caso 1). Se analizó, sin embargo, una simulación adicional (o Caso 2), asumiendo que la central NK se encuentra operativa bajo las consignas correspondientes al Escenario 1. En efecto, aun a pesar de que la central NK alberga un muy reducido volumen de regulación, se verá que las perturbaciones introducidas al régimen del río Santa Cruz tienen efectos perceptibles que exceden la escala diaria (o sea, que la menor resolución que la de la discretización temporal del esquema de cálculo adoptado).

JC 水电站的电力调度方案与 NK 水电站第 3 场景提出的方案类似，即发电功率来源于尽可能对流入水库的全部流量进行透平（图 4.26）。因此，对 JC 水电站的水库模型进行了模拟，并将圣克鲁斯河在 Charles Fuhr 流量站记录的水文序列作为边界条件之一进行分析，即假设河流上游未受任何干预（以下简称为案例 1）。此外，还进行了一个额外的模拟（或称案例 2），假设 NK 水电站按照第 1 场景的调度方案正常运行。事实上，尽管 NK 水电站的调节库容非常有限，但对圣克鲁斯河流量产生的干扰仍会带来超出日尺度的显著影响（即，影响超过了所采用计算方案的时间离散化分辨率）。

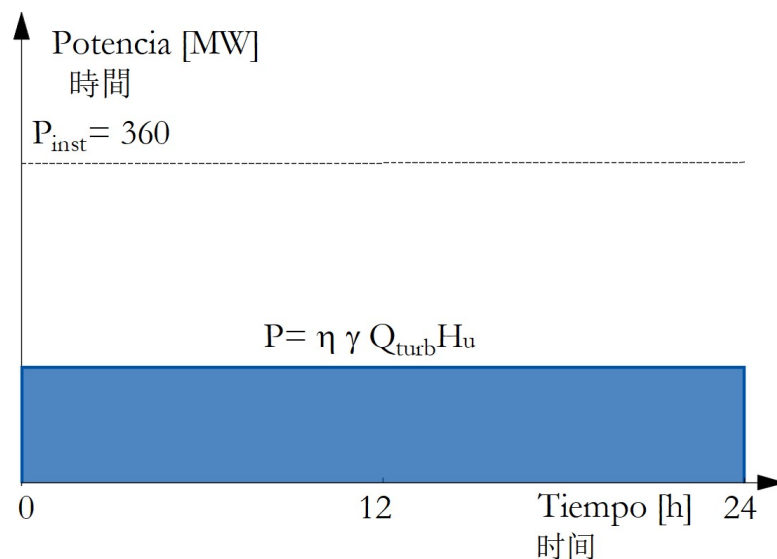


Figura 4.26: Diagrama de generación de potencia a lo largo del día bajo condiciones de normales de operación. La central opera cual si no tuviera capacidad de regulación, de tal manera que la potencia generada corresponde al caudal que fluye a través del río

图 4.26: 正常运行条件下全天发电量示意图。发电站在没有调节能力的情况下运行，发电量与河流流量相对应。



## 4.5. Central JC: Resultados

### JC 水电站：结果

#### 4.5.1. Matrices de operación

##### 运行矩阵

Tal como se ha notado en la Sección 4.3.1, las consignas operativas vinculadas al Escenario 3 de la central NK redundan en una dispersión de las condiciones de explotación de las turbinas a lo largo de su vida útil. Esta dispersión es tanto más notable en las turbinas de la central JC, sea operando aisladamente (es decir, recibiendo el caudal natural del río, Fig. 4.27), como en tándem con la central NK (Fig. 4.28). Este último caso asume que la central NK opera bajo las consignas de operación que caracterizan al Escenario 1. Nótese que el rango de frecuencias se encuentra por debajo de 15% en ambos casos, aun cuando la alternancia de las turbinas es menor, en virtud del menor número de unidades. Es visible también que el pico de frecuencia es sensible a la capacidad de regulación, si bien exigua, de la central NK: al mismo tiempo que aumenta de 9,73% a 13,49%, se desplaza desde las regiones de bajo salto y alta potencia a las de salto y potencia moderados que son propias de los periodos de caudal regulado a principios y mediados de cada año (Fig. 4.16 a Fig. 4.18). Por lo demás, es también distinguible cómo la operación del embalse describe una trayectoria entre las regiones de bajo salto y máxima potencia y las regiones de alto salto y potencia mínima.

如第 4.3.1 节所述，与 NK 电站方案 3 相关的运行限制导致水轮机在整个寿命期内的运行条件分散。无论是单独运行（即接受河流的自然水流，图 4.27），还是与 NK 电站并联运行（图 4.28），这种分散对 JC 电站的水轮机来说都更加明显。请注意，尽管由于机组数量较少，水轮机交替频率较低，但这两种情况下的频率范围都低于 15%。还可以看出，频率峰值对 NK 电站的调节能力很敏感（尽管很小）：在从 9.73% 增加到 13.49% 的同时，频率峰值从每年年初和年中调节流量时段的低水头和高功率区域转移到中等水头和功率区域（图 4.16 至图 4.18）。此外，还可以看出水库运行在低水头/最大功率区和高水头/最小功率区之间的轨迹。

#### 4.5.2. Factor de planta

##### 运行系数

Los factores de planta se evaluaron para los dos escenarios ensayados: cuando el caudal de entrada corresponde al de la serie hidrológica, por un lado; y cuando, en cambio, corresponde al caudal derramado por la central NK, por el otro. Los resultados son:

运行系数针对两种分析场景进行了评估：其一为入流量对应于水文系列的情况下；其二为入流量对应于 NK 水电站排放流量的情况下。结果如下：

- Caso 1:  $F_P = 0,622$ ;

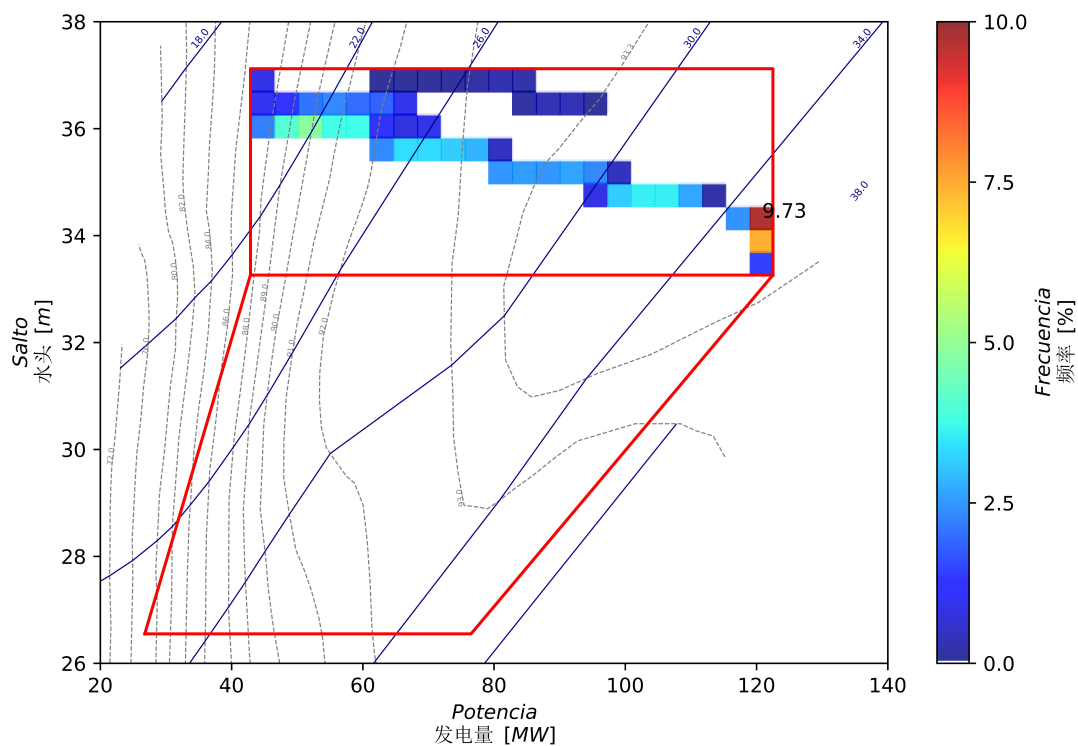


Figura 4.27: Matriz de operación de las turbinas de la presa JC (asumiendo su operación aislada)

图 4.27: JC 水坝涡轮运行矩阵（假设其独立运行）

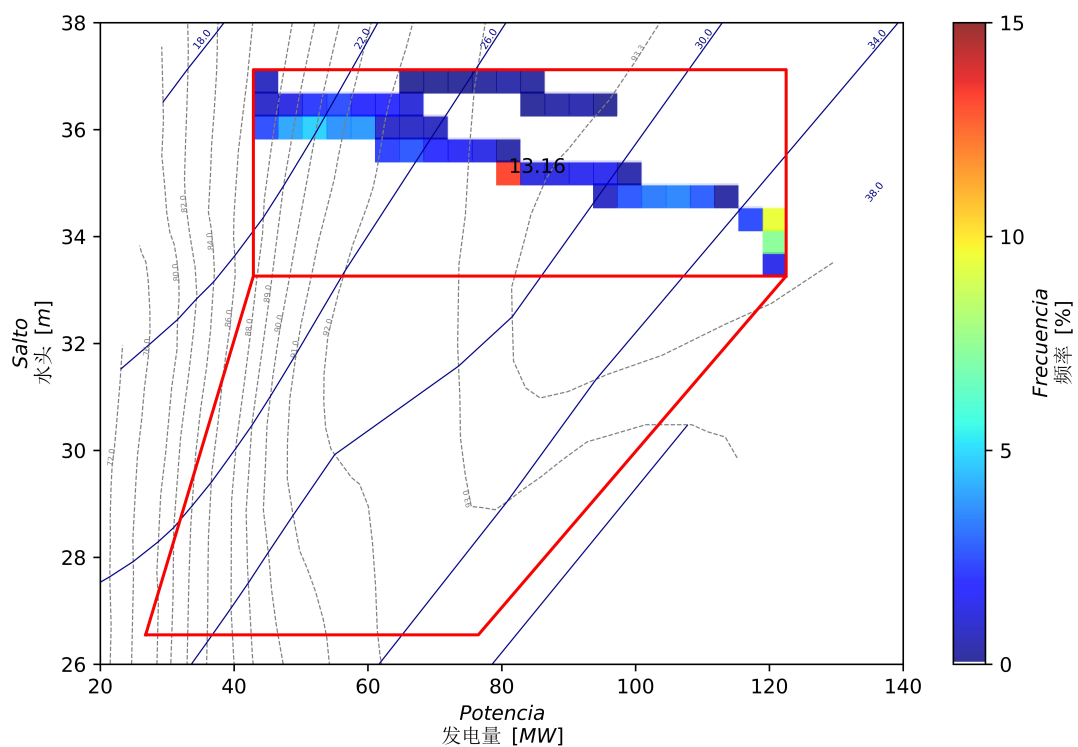


Figura 4.28: Matriz de operación de las turbinas de la presa JC (asumiendo su operación conjunta con la presa NK)

图 4.28: JC 水坝涡轮运行矩阵（假设其与 NK 水坝联合运行）

场景 1:  $F_P = 0.622$ ;

- Caso 2:  $F_P = 0.618$ .

场景 2:  $F_P = 0.618$

Claramente, los valores del factor de planta son sustancialmente más altos que los calculados para la central NK, lo cual responde a los particulares objetivos de uno y otro aprovechamiento: mientras que la central NK propende al abastecimiento de potencia empuntada, la central JC, por su parte, provee esencialmente potencia de base. Ello es relevante en el sentido de que la razón entre la potencia media respecto de la potencia instalada (que está íntimamente ligada al factor de planta) es tanto más alta en este último caso.

显然，JC 水电站的运行系数值显著高于 NK 水电站的计算值，这主要归因于两者在利用目标上的差异：NK 水电站主要用于提供尖峰负荷电力，而 JC 水电站则主要用于提供基荷电力。这一点尤为重要，因为平均功率与装机功率之比（与运行系数密切相关）在后一种情况下显得更高。

#### 4.5.3. Curvas de duración

##### 持续时间曲线

La comparación entre las curvas de duración resultantes de las dos simulaciones (Fig. 4.29) evaluadas revela dos divergencias menores, a saber: la potencia generada por la central JC cuando el río Santa Cruz se halla intervenido por las dos centrales hidroeléctricas se resiente muy levemente, lo cual puede explicarse por la merma del caudal por efecto del balance negativo entre precipitación y evaporación en el embalse NK; y la curva de duración correspondiente a la operación aislada de la central JC (la línea azul en la Fig. 4.29) es monótonamente decreciente, lo cual la distingue de la asociada a la operación en tándem. En efecto, durante aproximadamente un 10 % del tiempo de la simulación, los efectos de la regulación (si bien mínimos) de la central NK se tornan perceptibles; la potencia generada durante estos intervalos es del orden de 240 MW y relativamente constante, lo cual es consistente con el caudal erogado por la central de aguas arriba.

对两次模拟结果生成的持续时间曲线进行比较（见图 4.29）显示了两个小差异：首先，当圣克鲁斯河受到两座水电站的共同影响时，JC 水电站的发电量仅受到轻微影响，这可以解释为 NK 水库由于降水和蒸发之间的负水量平衡而导致流量减少；其次，JC 水电站独立运行时的持续时间曲线（图 4.29 中的蓝线）呈单调递减趋势，这与联合运行时的曲线不同。事实上，约有 10 % 的模拟时间内，NK 水电站的调节效应（尽管微小）变得可察觉；在这些时间段内，发电功率约为 240 MW，并且相对恒定，这与上游水电站的排放流量一致。

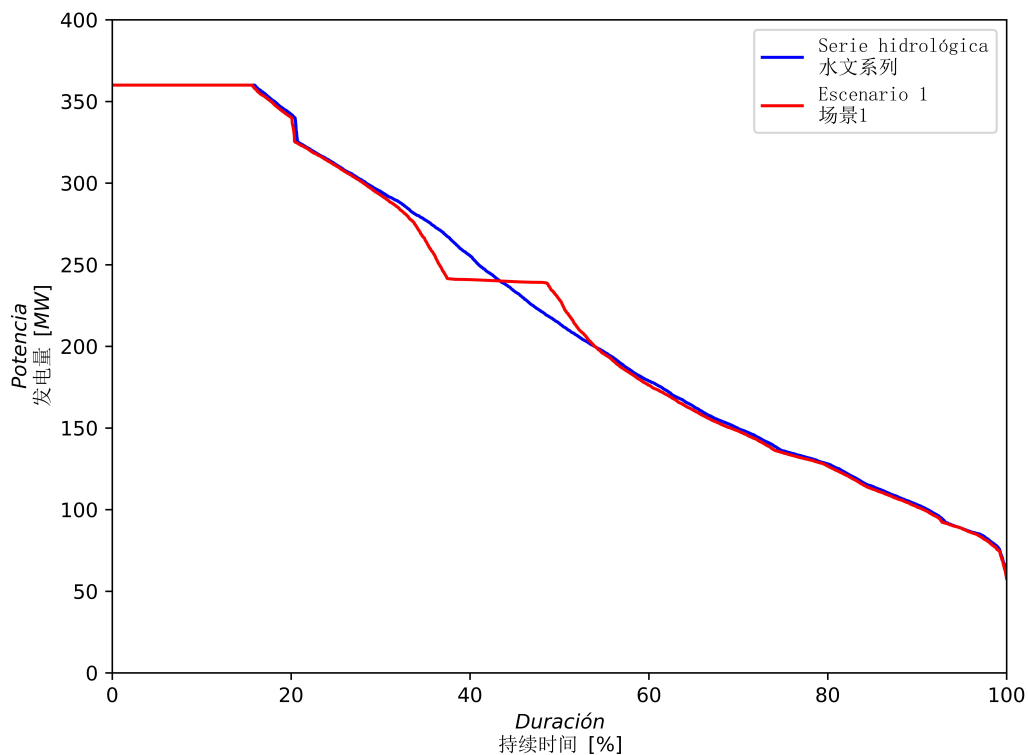


Figura 4.29: Curvas de duración correspondientes a los tres escenarios analizados

图 4.29: 对应于三个分析场景的持续时间曲线

#### 4.5.4. Energía media anual

##### 年均能量

Las simulaciones de los dos casos planteados arrojan los siguientes valores de energía media anual, calculados según la formulación proporcionada por la Ec. 3.4:

两个提出的案例的模拟结果根据公式 Ec. 3.4 计算得到以下年均能量值：

- Caso 1:  $EMA = 1961$  GWh/año;  
案例 1:  $EMA = 1961$  GWh/年；
- Caso 2:  $EMA = 1949$  GWh/año.  
案例 2:  $EMA = 1949$  GWh/年。

Es visible que la diferencia entre las energías medias anuales generadas en el caso de que la central JC opera aisladamente (es decir, asumiendo que el caudal de entrada es el del río Santa Cruz, imperturbado) respecto de aquel en que se asume que ambas presas se encuentran operativas es de 0,6 %, lo cual corrobora la intuición de que el régimen del río no se ve afectado significativamente en la escala diaria por la interposición de la central NK.

可以明显看出，当 JC 电站独立运行（即假设输入流量为未经干扰的圣克鲁斯河流量）与假设两座

水坝同时运行时，年均能量的差异为 **0.6 %**。这验证了一个直觉：**NK** 水坝的介入不会显著影响河流的日常流量模式。

# CAPÍTULO 5

## 第五章

### Conclusiones

#### 结论

Se han formulado los lineamientos de un modelo de simulación de embalse. En el proceso, se desarrolló la formulación matemática de los fenómenos más relevantes asociados al principio de conservación de la masa, que involucran condicionantes generales como los hidrológicos, topográficos y socioambientales, pero también los más íntimamente relacionados con la central hidroeléctrica, tales como las consignas de operación y las propiedades de las turbomáquinas.

制定了水库模拟模型的指导原则。在此过程中，制定了与质量守恒原理相关的，最重要现象的数学公式，其中涉及一般调节因素，如水文、地形和社会环境因素，以及与水电站更密切相关的因素，如操作指令和水轮机机的特性。

Se modeló la operación de embalses con y sin regulación y se lo aplicó a la simulación del complejo energético del río Santa Cruz, que se compone de las presas Néstor Kirchner y Jorge Cepernic (con anterioridad, Condor Cliff y La Barrancosa, respectivamente). Se contempló asimismo la operación de esta última aisladamente, en virtud de que entrará en funcionamiento en primer lugar.

圣克鲁斯河能源综合体由内斯托·基什内尔大坝和豪尔赫·塞贝尼克大坝（以前分别为孔多克里夫大坝和拉巴朗克萨大坝）组成，对调节水库和非调节水库的运行进行了模拟，并将其应用于模拟。单独考虑了后者的运行，因为它将首先开始运行。

Respecto de la central NK, se ensayaron tres escenarios bien distinguidos, signados, cada uno, por sus respectivas consignas de operación, a saber: generación de potencia empuntada, únicamente; generación mixta de potencia empuntada, durante periodos de pico de demanda, y de base, el resto del tiempo; y generación de potencia de base, cual si no hubiese regulación.

对 NK 电站进行了三种不同情景的测试，每种情景都有各自的运行设定点，即：仅发电调峰；在需求高峰期混合发电调峰，其余时间发电基荷；以及在没有调节的情况下的发电基荷。

Los resultados confirman que el rendimiento de la central merma conforme peor es el aprovechamiento de la energía de base. Por tal razón, el Escenario 3 es el que mejor aprovechamiento hace del recurso (y el Escenario 1, por el contrario, el peor) en términos de volumen neto de

energía eléctrica generada.

结果证实，基础能源利用率越低，电站的性能就越差。因此，就净发电量而言，方案 3 是资源利用最好的方案（方案 1 则是最差的方案）。

Se proyectaron los resultados en términos de la frecuencia de las condiciones de explotación sobre los diagramas de rendimiento de las turbinas a lo largo del periodo de simulación. Esta visualización permite observar cómo las condiciones de explotación correspondientes al Escenario 1 quedan confinadas a combinaciones de alta potencia y bajo salto; las correspondientes al Escenario 2 resultan en dos picos bien distinguidos, coherentemente con las condiciones de generación de potencia empuntada y de base; y las correspondientes al Escenario 3 se distribuyen más uniformemente en el espacio entre ambos extremos. Esta información puede ser de valor al momento de evaluar el rendimiento general de las turbinas seleccionadas.

根据模拟期间水轮机性能图上的运行条件频率，对结果进行了预测。通过可视化的方式可以看出方案 1 的运行条件仅限于高功率与低水头结合；方案 2 的运行条件产生了两个明显的峰值，与基线和调峰发电条件一致；而方案 3 的运行条件则更均匀地分布在两个极端之间。在评估所选水轮机的整体性能时，这些信息可能很有价值。

Respecto de la central JC, se analizaron las consecuencias de asumir su operación aisladamente, por un lado, y complementariamente a la central NK, por el otro. Si bien la diferencia entre los volúmenes totales de energía entregados en uno y otro caso no es relevante, sí se observa que la regulación de la central NK, aun mínima, introduce perturbaciones en la serie hidrológica que se traducen en que las condiciones de explotación de las turbinas se redistribuyen a lo largo del periodo estudiado. Así, las condiciones más frecuentemente encontradas se desplazan desde las regiones de bajo salto y alta potencia a las de salto y potencia moderados.

关于 JC 发电站，分析了其单独运行和与 NK 发电站互补运行的结果。虽然两种情况下的总发电量差别不大，但可以看出，NK 电站的调节，即使是最小的调节，也会对水文序列造成干扰，导致整个研究期间，水轮机的运行条件重新分配。因此，最常遇到的情况是从低水头和高功率区域转向中等水头和功率区域。

# CAPÍTULO 6

## 第六章

### Referencias

#### 参考书目

Liscia, S.O., Cacik, P., de Dios, M., Vath, B., Crecidas de diseño del río Santa Cruz, Universidad Nacional de La Plata, 2023

Liscia, S.O., Cacik, P., de Dios, M., Vath, B., 圣克鲁斯河设计洪水，拉普拉塔国立大学，2023 年

Marchal, M., Flesh, G., Sutter, P., The Calculation of Waterhammer Problems by Means of the Digital Computer, Proceedings of the International Symposium on Waterhammer Pumped Storage Projects, ASME, Chicago, 1965

Marchal, M., Flesh, G., Sutter, P., 利用数字计算机计算水锤问题，水锤抽水蓄能项目国际研讨会论文集，美国机械工程师学会，芝加哥，1965 年

Unión Transitoria de las Empresas Eling Energía S.A., China Gezhouba Group Co., Ltd., Hidrocuyo S.A., Presa Condor Cliff –Saltos, Reporte técnico NK-B.HM-MC.HI-(TC-00-00)-P001, 2018

联营体-ELING-中国葛洲坝集团-Hidrocuyo, CC 大坝-水头技术报告 NK-B.HM-MC.HI-(TC-00-00)-P001, 2018 年

Unión Transitoria de las Empresas Eling Energía S.A., China Gezhouba Group Co., Ltd., Hidrocuyo S.A., Represa Gob. Jorge Cepernic –Toma de agua - Pérdidas de carga, Reporte técnico JC-B.HM-MC.HI-(TC-00-00)-P001 0A, 2016

联营体-ELING-中国葛洲坝集团-Hidrocuyo, JC 大坝-进水口-压力降-技术报告 JC-B.HM-MC.HI-(TC-00-00)-P001 0A, 2016 年

Universidad Nacional de La Plata, Funcionamiento del sistema Lago Argentino-Río Santa Cruz-Embalse Condor Cliff, 2015

拉普拉塔国立大学，阿根廷湖系统运行-圣克鲁斯河-CC 水库，2015 年

Wylie, E.B., Streeter, V.L., Fluid Transients, McGraw-Hill Inc., 1978

Wylie, E.B., Streeter, V.L., 流体瞬变，McGraw-Hill, 1978 年