Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

Maurizio Tanzini

Impianti idroelettrici

progettazione e costruzione

Scheda sul sito > <

Seconda edizione aggiornata

Dario Flaccovio Editore

Aspetti geologici e geotecnici, tecnologie, dimensionamento, materiali

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

A mio padre Walter che m'insegnò la passione per lo studio della Geotecnica e l'importanza del rigore morale e professionale

Maurizio Tanzini

IMPIANTI IDROELETTRICI

Progettazione e costruzione



Maurizio Tanzini IMPIANTI IDROELETTRICI – PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE ISBN 978-88-579-0192-3

© 2008 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 – fax 091525738 www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Seconda edizione: aprile 2013

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Tanzini, Maurizio <1955->

Impianti idroelettrici : progettazione e costruzione / Maurizio Tanzini. - Palermo : D. Flaccovio, 2008. ISBN 978-88-7758-820-3
1. Impianti idroelettrici.

627 CDD-21 SBN Pal0213434

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Priulla, settembre 2008

INDICE

	ızione		9
Prem	nessa	»	11
	PARTE PRIMA		
	Cenni teorici di idraulica e idrologia		
1. Pr	INCIPI DI IDRAULICA		
1.1.	Il teorema di Bernoulli	»	23
1.2.	Definizioni fondamentali		23
1.3.			26
1.4.	Flusso dell'acqua nei tubi	»	28
	1.4.1. Numero di Reynolds	»	29
	1.4.2. Perdite di carico dovute all'attrito	>>	30
	1.4.3. Perdite dovute alla turbolenza		34
1.5.	Moto nei canali a pelo libero		39
1.6.	Progetto idraulico e requisiti strutturali delle condotte forzate		47
	1.6.1. Diametro della condotta forzata		48
	1.6.2. Spessore della parete del tubo	»	52
2. El	EMENTI DI IDROLOGIA TECNICA		
2.1.	Altezze e intensità di pioggia	»	55
2.2.	Apparecchi di misura		55
2.3.	Rete pluviometrica ed osservazioni	»	56
2.4.	Tipi pluviometrici italiani	»	59
2.5.	Piogge su zone estese e bacino imbrifero		62
2.6.	Regime dei corsi d'acqua italiani		64
2.7.	Bilancio idrologico		6
2.8.	Bacini glaciali, nivo-glaciali e pluviali		70
2.9.			72
2.10.	Misure di portata	»	74
2.11. 2.12	Portate di massima piena	»	75
2.12.	Diagrammi delle portate e dei deflussi	»	79
3. CL	ASSIFICAZIONI ED ELEMENTI CARATTERISTICI		
3.1.	Classificazioni		83
3.2.	Potenza di un impianto		84
3.3.	Energia ritraibile da un impianto		87
3.4.	Termini caratteristici delle utilizzazioni	»	92
4. Di	MENSIONAMENTO DI UN IMPIANTO IDROELETTRICO		
4.1.	Elementi caratteristici di una utilizzazione	»	93
4.2.	Curva di concentrazione		98
4.3.	Grandi serbatoi di regolazione	»	102
4.4.	Casi particolari di regolazione		107
4.5.	Deflusso minimo vitale	»	111
	Parte Seconda		
	Aspetti idraulici, civili ed elettromeccanici		
1. As	SPETTI PROGETTUALI DELLE SINGOLE OPERE		
1.1.		»	115
1.2.	Impianti fluviali senza canale di restituzione		121
1.3.	Impianti con canale di derivazione a pelo libero	»	123
	1		

1.4.	Impianti	i con derivazione in pressione e condotte forzate	» 12
1.5.		i direttamente connessi a dighe di ritenuta	
1.6.		i ad accumulazione con pompe	
2. Pi		IANTI IDROELETTRICI	
2.1.	Strutture	e per opere di presa e bacini di accumulo	» 14:
	2.1.1.	Dighe	» 14.
	2.1.2.	Traverse di derivazione	» 14.
	2.1.3.	Sfioratore di superficie	» 149
	2.1.4.	Dissipatori di energia	» 15
	2.1.5.	Scarichi di fondo	
	2.1.6.	Deviazione del fiume in fase di costruzione	» 15:
2.2.		frauliche	
	2.2.1.	Opere di presa	
	2.2.2.	Bacino o vasca di carico	
	2.2.3.	Opere elettromeccaniche in corrispondenza della presa	
	2.2.4.	Canali a pelo libero	
	2.2.5.	Condotte forzate	
23		li restituzione	
2.5.	Canan	ii restituzione	<i>"</i> 10.
3 Fc	MIDACCIA	MENTO ELETTROMECCANICO	
		della centrale	» 18′
		idrauliche	
3.2.		Criteri di classificazione	
	3.2.1.		
	3.2.2.	Criteri di scelta della turbina	» 20
4 Dr	O O C C C C C C C C C C C C C C C C C C	IONE E COSTRUZIONE DELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO	
			21
4.1.		ità	
4.0	4.1.1.	Definizioni	» 21
		oni di dighe a gravità e ad arco	
4.3.		gravità, criteri di progetto	
	4.3.1.	Metodo di resistenza al taglio (shear-friction method)	
	4.3.2.	Metodo dell'equilibrio limite	
	4.3.3.	Verifiche di resistenza	
	4.3.4.	Calcestruzzi e giunti di contrazione	
4.4.	Dighe a	d arco, criteri di progetto	
	4.4.1.	Modelli fisici e numerici	» 24
	4.4.2.	Progettazione degli scavi della diga	» 24
	4.4.3.	Iniezione dei giunti	» 25
	4.4.4.	Raffreddamento del calcestruzzo	
	4.4.5.	Trattamento delle fondazioni	» 25
	4.4.6.	Strumentazione di controllo	
5. IM	IPIEGO DE	L CALCESTRUZZO RULLATO E COMPATTATO PER LA COSTRUZIONE DELLE OPERE IDRAULICH	Е
5.1.	Introduz	zione	» 25°
5.2.		iale da costruzione	
J.2.	5.2.1.		
	5.2.2.	Cenere leggera	
	5.2.3.	Aggregati	
5.3.			
	Tinala	lella composizione del calcestruzzo	" 20
5.4.		ie di calcestruzzi per dighe	
5.5.		ionamento del calcestruzzo rullato e sue proprietà	
	5.5.1.	Resistenza a compressione	
	5.5.2.	Resistenza a trazione	
	5.5.3.	Modulo di elasticità	
	5.5.4.	Permeabilità	
5.6	Metodol	logie costruttive	» 2.7'

Parte Terza Aspetti geologici e geotecnici

1. As	PETTI GEO	DLOGICI E GEOTECNICI		
1.1.		tione		81
1.2.	Le attivi	tà di progettazione		
	1.2.1.	L'indagine geologica		
	1.2.2.	I parametri geomeccanici	» 28	83
1.3.	Criteri p	per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso		
	1.3.1.	Prove e modello geomeccanico		
	1.3.2.	Impiego delle classifiche tecniche		97
	1.3.3.	Caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso		20
	1.3.4.	Previsione della deformabilità mediante classifiche tecniche	» 3′	26
2 Tn	ATTAMEN	TO E MIGLIORAMENTO DELLE FONDAZIONI ROCCIOSE DELLE GRANDI DIGHE		
2.1 K		a	3	33
2.2.		i		34
۷.۷.	2.2.1.	Generalità		34
	2.2.1.	Materiali per le iniezioni		35
	2.2.3.	Pressioni e permeabilità		38
	2.2.4.	Metodi di iniezione		40
	2.2.4.	Iniezioni di consolidamento		40 45
	2.2.5.			47
		Iniezioni di impermeabilizzazione		47 49
	2.2.7.	Iniezioni di contatto o sutura		
2.2	2.2.8.	Assorbimenti		51
2.3.		i		
	2.3.1.	Scopo		53
	2.3.2.	Procedimento	» 3:	54
2 D				
		ONE E COSTRUZIONE DELLE DIGHE IN TERRA		
3.1.		ione		
3.2.		amma di indagine		
3.3.		definizione della soluzione: tipo di diga		58
	3.3.1.	Dighe non zonate (omogenee)		
	3.3.2.	Dighe zonate a nucleo largo		60
	3.3.3.	Dighe zonate a nucleo sottile		60
	3.3.4.	Dighe zonate a nucleo inclinato	» 30	61
	3.3.5.	Dighe con manto impermeabile	» 30	62
	3.3.6.	Hydraulic fills	» 30	63
	3.3.7.	Discariche di sterili di miniera (Tailings dams)		63
3.4.	Fasi cos	truttive ed operative della diga	» 30	63
	3.4.1.	Metodo dell'equilibrio limite	» 30	67
3.5.	Moto di	filtrazione attraverso la diga	» 3'	77
	3.5.1.	Sifonamento e sollevamento del fondo scavo	» 3'	77
3.6.	Progetta	zione dei drenaggi		82
3.7.	Controll	o della filtrazione	» 38	84
3.8.	Aspetti	fondamentali per la costruzione di un'opera in terra	» 39	91
	3.8.1.	Studio delle cave di prestito		92
	3.8.2.	Definizione delle caratteristiche di compattazione		93
	3.8.3.	La pressione interstiziale in un rilevato di terreno coesivo		
3.9.		tazione		
APPI	ENDICE			
		ione	» 40)9
		razioni geologiche e geotecniche		
		mportanza della stretta collaborazione fra geologo e ingegnere		
	A.2.2. I	'indagine geologica a grande scala	» 4	
		0 0 0 0		

	A.2.3. Importanza di un approccio interdisciplinare condotto da un affiatato gruppo		
	di specialisti		411
A.3.	Analisi di stabilità dei pendii naturali in terreni	>>	416
	A.3.1. Introduzione		416
	A.3.2. Analisi all'equilibrio limite globale	>>	416
	A.3.3. Soluzioni grafiche	>>	420
	A.3.3.1. Definizione della pendenza media del pendio, della resistenza al taglio		
	e del peso di volume		420
	A.3.3.2. Analisi di stabilità di un pendio indefinito	>>	423
	A.3.4. Calcoli manuali	>>	425
	A.3.5. Analisi di stabilità con programmi di calcolo		428
A.4.	Analisi di stabilità dei pendii rocciosi	>>	429
	A.4.1. Introduzione	>>	429
	A.4.2. Rottura lungo un'unica discontinuità		433
	A.4.2.1. Analisi cinematica	>>	433
	A.4.2.2. Analisi di stabilità	>>	433
	A.4.2.3. Esempio di analisi di stabilità	>>	436
	A.4.3. Stabilità di un cuneo di roccia di forma tetraedrica	>>	438
	A.4.3.1. Analisi cinematica	>>	438
	A.4.3.2. Analisi di stabilità	>>	439
	A.4.3.3. Esempio di analisi di stabilità		440
	A.4.4. Dissesti per ribaltamento		442
	A.4.4.1. Analisi cinematica	>>	443
	A.4.4.2. Analisi di stabilità	>>	444
A.5.	Analisi di stabilità dei versanti di un bacino artificiale per la condizione di svaso rapido	>>	446
A.6.	Analisi di stabilità e NTC 2008		453
	A.6.1. Le Nuove norme tecniche per le costruzioni	>>	453
	A.6.1.1. Generalità	>>	453
	A.6.1.2. Criteri generali di progetto e verifiche di sicurezza		454
	A.6.1.3. Esempi applicativi		457
	A.6.1.3.1. Approccio progettuale 1 – Combinazione 2	>>	458
	A.6.1.3.2. Approccio progettuale 1 – Combinazione 2		459
	A.6.1.3.3. Approccio progettuale 1 – Combinazione 2	>>	461
A.7.	La frana del Vajont	>>	474
	A.7.1. Introduzione		474
	A.7.2. Aspetti generali		475
	A.7.3. Inquadramento geologico	>>	480
	A.7.4. Eventi e caratteristiche che hanno influenzato la stabilità dei versanti del serbatoio		481
	A.7.5. Cause della frana		484
	A.7.6. Considerazioni geomeccaniche sulla frana		486
	A.7.7. Lezioni apprese		501
			231
Bibli	ografia	>>	507

Prefazione

Fino alla metà circa degli anni Sessanta l'energia idroelettrica forniva più del 50% del fabbisogno elettrico del nostro paese. Il petrolio a basso prezzo e le ingenti quantità di energia necessarie ad accompagnare il rapido sviluppo industriale italiano portarono poi alla predominanza degli impianti termoelettrici, alimentati ad olio combustibile, a carbone, a gas. La loro superiorità economica fu determinata, oltre che dal basso prezzo dei combustibili fossili, dalla possibilità di avere potenze maggiori e una continua produzione di energia elettrica, non limitata dalla disponibilità di acqua. La stessa logica che spinse il nostro paese, fra i primi al mondo, verso l'energia nucleare, la cui storia, sempre travagliata, si è poi arenata nelle secche del referendum del 1987.

Ma torniamo all'energia idroelettrica. Non vi è dubbio, innanzitutto, che fra gli amanti dei problemi e delle tecniche energetici, ma anche presso un pubblico più ampio, essa goda di molte preferenze. La magia dell'acqua che, cadendo, si trasforma in energia elettrica; i paesaggi montani dove di solito è insediata; i laghi e i bacini artificiali con i quali spesso si accompagna; la pregevole fattura, sovente, dei suoi edifici risalenti in molti casi a molti decenni fa o la spettacolarità delle caverne dove più recentemente è stata alloggiata: tutti fattori che affascinano e richiamano assai più delle ciminiere degli impianti termici. La storia delle centrali idroelettriche è spesso una storia "eroica": grandi lavori, montagne e corsi d'acqua addomesticati; ma anche una storia drammatica, purtroppo, come ci ricorda, in Italia, la tragedia del Vajont: duemila persone che persero la vita a causa dell'onda gigantesca che franò nel bacino di quella diga appena costruita, distruggendo completamente tre paesi. Tanto per ricordarci che quando la capacità tecnica e la ricerca dell'utile economico non si accompagnano alla necessaria umiltà si trasformano in minacce terribili.

Ed infine c'è l'elemento di fascino strutturale, invisibile, ma percepito. Energia elettrica che viene prodotta in maniera completamente pulita e per sempre rinnovabile: un miracolo che oggi inseguiamo con nuove tecnologie e risorse, sole e vento innanzitutto, ma che in Italia, pioniera dell'energia idroelettrica, era già fatto concreto 100 anni fa.

Anche per tale motivo questa fonte è tornata d'attualità. Nel nostro paese è oramai scarsa, perché pochi sono i corsi d'acqua ancora disponibili, ma l'esigenza di aumentare la quota di energia da fonti rinnovabili è diventata così forte da spingerci all'utilizzo anche delle risorse più marginali e al potenziamento di quelle già esistenti. Nel mondo invece c'è ancora spazio per grandi progetti.

In questa congiuntura storica sta l'attualità del presente volume, che fa il punto e la sintesi di più di 100 anni di ricerche e miglioramenti tecnologici. E che presenta un impianto idroelettrico efficiente come la combinazione ottimale di molti fattori: scelta del sito, opere civili, tecnologie adottate. Dopodiché non rimane altro che alzare gli occhi al cielo e sperare, al contrario di quello che si augurano molti, che piova e che nevichi. Sapendo che stiamo, in questo modo, immagazzinando energia: pulita e sempre rinnovabile.

Prefazione seconda edizione

Nella presente seconda edizione è stata inserita un'appendice relativa alla fondamentale problematica geologica e geotecnica della stabilità dei versanti interessati dalla presenza del bacino artificiale, creato dallo sbarramento dell'impianto idroelettrico. In tale appendice è anche trattata, in un apposito paragrafo, la frana del Vajont della quale quest'anno si commemorano i 50 anni. Il 9 ottobre 1963, infatti, una frana di enormi proporzioni, staccatasi dal monte Toc, si abbatté sul lago artificiale creando una enorme onda che, tracimando la diga del Vajont, distrusse e, letteralmente, polverizzò il paese di Longarone causando più di 2000 morti. Tale immane tragedia resterà per sempre un importante ammonimento sulle fondamentali responsabilità dei progettisti di opere civili ed infrastrutture. In particolar modo proprio la progettazione e costruzione delle dighe e degli impianti idroelettrici rappresentano anche oggi una delle sfide professionali più delicate ed impegnative per tutti gli specialisti coinvolti nella progettazione di un'opera così complessa, a partire dai geologi, dai geotecnici e dagli ingegneri civili.

Tuttora l'immane disastro della frana del Vajont è meritevole di essere studiato e approfondito per gli insegnamenti che la vicenda ha offerto a partire, come viene discusso nell'appendice, dalla comprensione dell'importanza fondamentale che si sviluppi, durante le diverse fasi progettuali (dallo studio di fattibilità al progetto esecutivo), un lavoro interdisciplinare basato sulla stretta collaborazione e rispetto reciproco fra geologi e ingegneri geotecnici e civili. Occorre inoltre tenere comunque presente che in questi ultimi 50 anni l'ingegneria geotecnica, in modo particolare per quanto concerne la meccanica delle rocce, ha registrato importanti progressi per quanto riguarda le conoscenze teoriche, le tecniche di indagine e gli strumenti di calcolo e di analisi disponibili per l'interpretazione dei dati sperimentali e per la progettazione.

Infine, occorre ricordare come tra le conseguenze del disastro della frana del Vajont, a livello mondiale, sono state modificate e migliorate tutte le normative relative alla costruzione di nuovi serbatoi imponendo importanti prescrizioni come, ad esempio, quelle relative ad un accurato rilevamento geologico – tecnico, corredato da analisi di stabilità dei versanti. Anche in Italia, proprio a seguito della frana del Vajont, sono state migliorate le normative prescrivendo severe indagini, con le tecniche più aggiornate, per arrivare a conoscere e valutare non solo la stabilità delle imposte della diga, la loro impermeabilità e l'impermeabilità del bacino ma anche la stabilità dei versanti.

Milano, febbraio 2013

Maurizio Tanzini

Premessa

Nel marzo del 2007 l'Unione europea ha approvato l'ambizioso obiettivo di raggiungere una quota del 20% di energia verde entro l'anno 2020. Per rendersi conto della portata di questa decisione si consideri che per il raggiungimento di tale traguardo occorrerà nei prossimi 13 anni triplicare l'attuale quota di energie rinnovabili che include tutto l'idroelettrico costruito nel secolo scorso, i 48 GW di eolico, i quasi 20 milioni di metri quadrati di solare termico, gli oltre 60 MTep da biomassa (dove con Tep si intende la tonnellata equivalente di petrolio).

Gli investimenti necessari alla sola produzione di elettricità verde saranno superiori alle risorse che verranno destinate alla costruzione di nuove centrali termoelettriche e già questo dato indica il ribaltamento delle scelte in atto. L'energia è un punto chiave per lo sviluppo sostenibile. La Commissione europea stima che la domanda globale di energia aumenterà del 70% in 30 anni (2000-2030); tale crescita dei consumi di energia causerà un considerevole incremento delle emissioni di gas serra: le stime prevedono che le emissioni di CO, in Europa nel 2030 saranno aumentate del 18% rispetto al livello del 1990. Le energie rinnovabili sono quindi fondamentali per la soluzione del problema dei cambiamenti climatici. L'idroelettrico è la prima fonte di energia rinnovabile in termini di produzione mondiale, giocando quindi un ruolo di primaria importanza nella produzione di elettricità da FER (fonti energetiche rinnovabili) che gli consentirà in futuro di contribuire in modo significativo al soddisfacimento del fabbisogno energetico, offrendo un'alternativa eccellente alla produzione energetica basata sui combustibili fossili. Il cambiamento climatico è stato definito come il maggiore problema globale con cui la comunità internazionale si deve confrontare attualmente. I suoi effetti sono già osservabili in tutto il mondo e si manifestano nell'aumento delle temperature, nello scioglimento dei ghiacci e nella variabilità delle condizioni meteorologiche. Queste variazioni climatiche sono il risultato diretto dell'effetto serra, causato da un aumento della concentrazione di gas serra nell'atmosfera, pertanto l'anidride carbonica proveniente dagli impianti alimentati a combustibili fossili, dall'industria e dal settore dei trasporti ne è di gran lunga la principale responsabile. La necessità di una mitigazione dei cambiamenti climatici, emersa nelle diverse conferenze intergovernative sul clima e sul Protocollo di Kyoto, già da sola giustificherebbe un maggiore sviluppo delle energie rinnovabili. Tuttavia, non è l'unico argomento a favore: le rinnovabili contribuiscono ad aumentare la sicurezza degli approvvigionamenti riducendo la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili,
una dipendenza che ha risvolti di carattere economico, sociale, ecologico e
di sicurezza. L'approvvigionamento energetico è infatti un servizio vitale e
di pubblico interesse. Lo sviluppo dell'energia verde rappresenta quindi una
sfida di importanza fondamentale per lo sviluppo e la stessa sopravvivenza
dell'umanità.

Per quanto riguarda l'idroelettrico in Italia, la liberalizzazione del mercato energetico e la progressiva presa di coscienza da parte delle amministrazioni locali dell'importanza dell'utilizzo razionale delle risorse del territorio e della tutela dell'ambiente dovrebbe permettere un ulteriore sviluppo dell'idroelettrico.

La presenza di opere produttive costringe, infatti, a un costante e puntuale presidio e manutenzione del territorio prevenendo dissesti e degradi. Inoltre le moderne tecniche costruttive consentono l'esecuzione di opere non solo non invasive ma spesso di ulteriore fruibilità del territorio.

A titolo di esempio, un piccolo impianto idroelettrico in grado di produrre circa 4500 MWh/anno di energia verde è indirettamente responsabile, se confrontata con energia prodotta da olio combustibile, delle seguenti mancate emissioni in atmosfera:

- mancata emissione di SO₂ per una quantità compresa fra un minimo di 8 t/anno e un massimo di 60 t/anno;
- mancata emissione di CO₂ per una quantità compresa fra un minimo di 3400 t/anno e un massimo di 4400 t/anno;
- mancata emissione di NO_x (ossidi di azoto) per una quantità compresa fra un minimo di 6 t/anno e un massimo di 14 t/anno;
- mancata emissione di particolati per una quantità compresa fra un minimo di 0,9 t/anno e un massimo di 6 t/anno;
- mancata emissione di metano per una quantità compresa fra un minimo di 6 t/anno ed un massimo di 8 t/anno (The European renewable energy study Prospects for renewable energy in the European Community and Eastern Europe up to 2010, Commission of European Communities Directorate general for energy (DG XVII), Brussels, 1994).

La nuova energia prodotta da fonte rinnovabile dispone, inoltre, di due forme distinte di valorizzazione: una derivante dall'autoconsumo o dalla vendita dell'energia, l'altra dalla cessione dei cosiddetti *certificati verdi*. Questi (si veda anche *www.certificativerdi.it*) sono stati introdotti con il Decreto Legislativo 79/99 (Decreto Bersani), attraverso il meccanismo del

portfoglio, cioè l'obbligo di produrre una quota fissa (attualmente pari al 2%) di energia da fonti rinnovabili per certi operatori e a determinate condizioni. L'obbligo suddetto può anche essere assolto comprando certificati di produzione dell'energia da fonti rinnovabili (appunto certificati verdi, emessi dal GRTN – gestore della rete di trasmissione nazionale – ai sensi del D.M. MICA 11/11/1999) corrispondenti alla produzione immessa in rete da impianti da fonte rinnovabile entrati in esercizio dopo la validità del decreto, il 31/03/1999.

In questo modo gli impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili hanno la possibilità di incrementare il prezzo di cessione alla borsa elettrica mediante la vendita dei certificati verdi.

Per quanto riguarda invece la valutazione economica dell'energia, essa dipende dalla destinazione dell'energia prodotta, in particolare in un mercato in via di liberalizzazione. La normativa recente, varata dall'Autorità per l'Energia e il Gas con le delibere n. 228/01, 36/02 e 81/02, crea condizioni più favorevoli, rispetto al passato, al trasporto e allo scambio, e quindi all'autoconsumo dell'energia prodotta.

NOTE STORICHE

La prima regolamentazione sulle acque e sulla disciplina del loro utilizzo risale alla metà del 1800, in particolare compare in uno degli allegati che componevano la legge 20 marzo 1865 n. 2248 "Per la unificazione amministrativa del Regno d'Italia", che richiamava una precedente legge del 1859, già adottata nel Regno di Sardegna.

Successive leggi, che tenevano sempre più conto dell'importanza della crescita industriale nell'economia del Paese e del progresso nel campo della produzione e trasmissione dell'energia elettrica, delinearono con più cura lo scenario dello sfruttamento dei fiumi e dei canali a scopo idroelettrico; esse culminarono con il R.D. 14 agosto 1920, n. 1285 "Regolamento per le derivazioni ed utilizzazioni di acque pubbliche", e soprattutto con il R.D. 11 dicembre 1933, n. 1775 "Testo Unico delle disposizioni di legge sulle acque e sugli impianti elettrici", che rappresentano l'antica e solida base della vigente legislazione in materia.

L'era delle grandi utilizzazioni idrauliche per forza motrice e il diffondersi dell'energia elettrica in ogni ramo dell'attività umana si può fare risalire al 1891 quando, a seguito dell'invenzione di Galileo Ferraris, venne effettuato il primo esperimento del trasporto a distanza, da Lauffen a Francoforte, dell'energia elettrica sotto forma di corrente trifase.

In Italia le prime concrete affermazioni si ebbero nello stesso periodo con la costruzione dell'impianto idroelettrico di Isoverde della Società Acquedotto De Ferrari-Gallera, per trasmettere a Genova energia sotto forma di corrente continua, e dell'impianto di Tivoli della Società Anglo-Romana per trasmettere a Roma energia sotto forma di corrente alternata.

Ma l'impianto che segnò l'inizio delle moderne sistematiche utilizzazioni deve ritenersi (Contessini, 1946) quello di Paderno sull'Adda, ultimato nel 1898 ed utilizzante una portata massima di 50 m³/s su un salto di 28,8 m. Questo impianto, il più grande d'Europa in quel momento, raggiunse la potenza installata di 10.000 kW, consentendo inoltre il trasporto dell'energia prodotta a una distanza di 32 km, sino a Milano.

Seguirono, nel giro di pochi anni, diverse altre utilizzazioni con salti sempre maggiori, così che la potenza installata complessivamente in Italia, di circa 80.000 kW alla fine del 1892, raggiunse, dieci anni dopo, 250.000 kW.

Concettualmente tutti gli impianti costruiti fino al 1902 erano progettati per impiegare le sole portate disponibili durante l'anno per cui l'impianto ben riuscito in quel periodo era quello che mai soffriva di deficienze idriche, in quanto il progettista aveva predisposto l'opera sulla minima portata di magra del corso d'acqua utilizzato. Ma se da un lato l'acqua inutilizzata si perdeva, defluendo negli alvei dei fiumi e dei torrenti, dall'altro anche l'acqua derivata si traduceva solo in parte in forza motrice, giacché la richiesta dell'energia variava nel corso delle giornata secondo un diagramma non affatto costante che induceva a sprechi d'acqua notevoli.

Nel decennio 1902-1912 il ritmo delle utilizzazioni si accelera e si profila una nuova concezione economica dell'uso dell'acqua con la predisposizione degli impianti per portate disponibili anche soltanto una parte dell'anno. Inoltre essi vengono dotati, prima, di serbatoi atti ad immagazzinare l'acqua non utilizzata in alcune ore del giorno per erogarla in quelle di maggiore richiesta di energia, poi di grandi serbatoi stagionali che accumulano l'acqua nei periodi pingui per elargirla in quelli più secchi.

L'Italia tutta si arricchisce in questo periodo di impianti di forza motrice di ogni natura e per una larga gamma di salti e portate, ed ha inizio contemporaneamente lo sfruttamento integrale di alcuni bacini idrografici.

Alla fine del 1912 l'utilizzazione delle forze idrauliche in Italia raggiungeva 700.000 kW.

Nel decennio 1912-'22, l'intensificata attività nazionale e la siccità dell'inverno 1917-'18, aggravata dalla mancanza di carbone a causa della guerra, che non consentiva il pieno utilizzo delle poche centrali termiche, indussero

a pensare all'accrescimento delle fonti per evitare gravi deficienze nel servizio elettrico con disagio degli utenti. Nel contempo si andava affermando, sempre più vigoroso, il concetto di economico uso delle acque e si generalizzava il principio dell'organica e integrale utilizzazione dei bacini imbriferi con la tendenza a spingere le derivazioni a portate sempre più discontinue e a colmare le deficienze di produzione con una dotazione sempre più ricca di serbatoi artificiali.

La magra del 1921-'22 (figura 1) diede altro impulso alla costituzione dei serbatoi artificiali ed estese l'uso delle connessioni fra gli impianti e particolarmente fra quelli a diversi regimi idrici, favorendo determinate classi di utilizzazioni, come quelle a deflussi meno perenni.

Alla fine del 1922 la potenza installata in Italia toccava 1.240.000 kW.

L'IMPIANTO DI PADERNO

Un esempio tipico che bene si presta a rappresentare l'evoluzione dei criteri direttivi nello sfruttamento delle risorse idrauliche dalle origini fino alla metà degli anni Quaranta è costituito dall'impianto di Paderno.

L'impianto fu messo in esercizio nell'ottobre 1898 per fornire energia elettrica alla città di Milano, che solo da qualche anno aveva costruito una rete di distribuzione per illuminazione e si preparava all'adozione della trazione elettrica nelle tramvie.

Il criterio per il dimensionamento era stato assai semplice: quello di assicurarsi con le acque dell'Adda una potenza costantemente disponibile ogni giorno per tutti i dodici mesi dell'anno, basandosi sulla minima invernale.

In tale piano la centrale termoelettrica preesistente (nella cerchia della città, a Porta Volta) veniva ad assolvere unicamente la funzione di riserva, allo scopo di assicurare la continuità del servizio.

Quando nel 1906 la Società Edison deliberò di provvedersi di nuova energia ricorrendo ancora all'Adda, si era già fatto strada il concetto di proporzionare l'impianto a una portata superiore a quella di minima magra ed integrare la deficienza stagionale con energia termica. D'altra parte era pure apparsa la possibilità d'approfittare di un maggiore dislivello proprio nel tronco fluviale interessato dall'impianto di Paderno; perciò fu ideato un secondo impianto sottendente il primo, pur lasciando questo in funzione.

La nuova presa fu disposta un chilometro circa a monte dell'altra e la restituzione alquanto più a valle della centrale esistente, sfruttando in tal modo un salto di 39 m. Le strutture idrauliche del nuovo impianto, che si chiamò di

Robbiate dal nome della località ove sorse lo sbarramento, furono proporzionate a una portata massima di 80 m³/s, cosicché le due centrali, funzionando assieme ed idraulicamente in parallelo, potevano derivare nel periodo di morbida una portata complessiva di 130 m³/s.

Alla nuova centrale venne affidato il servizio di base; l'impianto di Paderno usufruiva dell'eccesso stagionale di portata e alla centrale termoelettrica (di Porta Volta) veniva riservato il compito di compensare le deficienze stagionali. Infine considerato che lo sbarramento di Robbiate creava nel letto del fiume un dislivello di circa 8,5 m fra il pelo liquido a monte e quello a valle della diga, si pensò di progettarvi una centrale (Calusco) per utilizzare le acque di morbida eccedenti la portata di Robbiate, prima di passare ad alimentare la centrale di Paderno. Le opere idrauliche, commisurate a una portata di 85 m³/s, vennero iniziate nel 1917 e la centrale di Calusco entrò in servizio nell'agosto del 1920.

Con quest'ultima centrale la potenza massima complessiva del sistema salì a oltre 36.000 kW.

I diagrammi della figura 1 illustrano il compito affidato rispettivamente ai

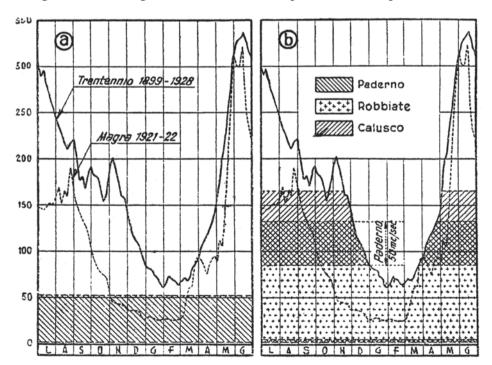


Figura 1 Utilizzazione delle portate dell'Adda secondo la vecchia (a) e la nuova (b) concezione

tre impianti e valgono a sintetizzare la vecchia e la nuova concezione nello sfruttamento delle risorse idrauliche.

Similmente al caso di Paderno ebbero compimento, nel periodo 1912-'22, importanti ricostruzioni o trasformazioni di opere esistenti per raggiungere un più elevato grado di utilizzazione delle acque disponibili.

Sino al primo scorcio degli anni Sessanta l'idroelettrico ha vissuto una fioritura apparentemente inesauribile: in tema di grosse derivazioni (al tempo tutte quelle con potenza nominale superiore a 220 kW), dalle 563 centrali e 2100 MW installati nel 1925 si passò a 1142 centrali e 12.150 MW installati nel 1962, periodo in cui la sua produzione raggiunse quasi il 70% del totale dell'energia prodotta in Italia.

L'ENERGIA IDROELETTRICA IN ITALIA

L'idroelettrico costituisce la più importante e tradizionale fonte di energia rinnovabile in Europa e ad oggi copre l'11% della produzione complessiva di energia elettrica. Tuttavia, le diverse politiche di sfruttamento e la disomogenea disponibilità della risorsa si riflettono sui dati di potenza installata e di produzione nei diversi stati europei.

In Italia l'idroelettrico costituisce la più importante risorsa energetica interna, rappresentando il 24% della potenza efficiente lorda installata e fornendo il 14% della produzione elettrica lorda complessiva. La produzione idroelettrica, che si concentra nelle regioni settentrionali e in particolare in Lombardia, Piemonte e Trentino, costituisce inoltre il maggior contributo nazionale (75%) alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Dall'analisi dei dati del 2005 relativi agli impianti idroelettrici emerge la predominanza del numero di impianti di piccola taglia (85%), sebbene il maggiore contributo alla produzione di energia idroelettrica (87%) risulti fornito da centrali di potenza superiore a 10 MW.

Tabella '	1. Produzione	idroelettrica	in Italia
-----------	---------------	---------------	-----------

Potenza	nza Numero di impianti Potenza efficiente lorda		Produzio	ne lorda		
[MW]	-	[%]	[MW]	[%]	[GWh]	[%]
< 1	1.157	56	419	2	1.998	4
1 - 10	605	29	1.986	9	4.896	9
> 10	300	15	18.937	89	45.088	87
Totale	2.062	100	21.342	100	51.982	100
Anno 2005 – For	nte: Terna, elabora	zione APER				

Negli ultimi cinque anni l'idroelettrico ha visto un incremento costante della potenza installata che, tuttavia, non si è tradotto in un pari aumento della produzione, la cui variabilità è riconducibile a situazioni climatiche e idrologiche particolari (minor piovosità o piovosità concentrata in episodi molto intensi, che non rendono possibile il completo utilizzo delle portate da parte degli impianti) e a una serie di altri fattori gestionali (introduzione del DMV – deflusso minimo vitale) ed economici difficilmente valutabili.

Tabella 2. Valori della produzione idroelettrica annuale in Italia

Anno	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006*
Produzione lorda (PR) [GWh]	44.205	46.810	39.519	36.674	49.908	42.927	43.002
Potenza efficiente lorda (PE) [MW]	20.658	20.744	20.837	20.987	21.073	21.350	n.d.
* Dati provvisori – Fonte: Terna, elaborazione	APER						

La tabella 3 riepiloga la potenza e la producibilità degli impianti idroelettrici secondo la categoria degli impianti (dati aggiornati al 31 dicembre 2005).

CENNI SULL'OPERA

La presente pubblicazione si occupa di tutte le problematiche progettuali e costruttive degli impianti idroelettrici a partire dai grandi impianti – costituiti da sbarramento e presa, condotto derivatore, vasca di carico o pozzo piezometrico, condotta forzata, motori idraulici e canale di restituzione – fino ai piccoli impianti per i quali, analogamente, tutti gli aspetti progettuali, a partire da quelli geologici e geotecnici, non devono essere sottovalutati.

Per facilità di esposizione dello stato dell'arte sull'argomento, il libro è stato suddiviso in tre parti. La prima parte si occupa degli aspetti teorici per quanto riguarda i principi di idraulica, gli elementi di idrologia tecnica, la classificazione e gli elementi principali degli impianti idroelettrici e il dimensionamento di un impianto idroelettrico. La seconda parte tratta tutti gli aspetti di ingegneria idraulica, civile ed elettromeccanica che riguardano la progettazione di un impianto idroelettrico, un'opera per la quale è necessario un approccio prettamente interdisciplinare. Infine, nella terza parte, sono trattati gli aspetti geologici e geotecnici che, sia per i grandi sia per i piccoli impianti idroelettrici, sono di fondamentale importanza come testimoniato dai numerosi crolli e disastri avvenuti in passato durante la costruzione o l'esercizio di importanti dighe.

Tabella 3. Potenza e producibilità negli impianti

					370 0 0 0 0 0 0	LINE CRAIA!	מייף		2	14/41
		•	Lorenza	Ioiiiiaie	רטופווזמ פווו	rotenza emiciente įmvyj	Produc	Froducibilita lorda illedia allilua [GWil]	eula allilua [G	MII
Tipo	Tipologia di impianto	N. Impianti	Motori primi	Generatori	l orda	Noffs	Da apporti	Da apporti di	Da apporti di pompaggio	Totalo
			[MM]	[MVA]	LOIGA	ואפוומ	naturali	Di gronda	Volontario	- Otale
() ()	Normali	103	8.908,9	9.982,9	8.406,3	8.280,8	9.809.6	112,5	3.183,6	13.105,7
A serbatoro	Pompaggio puro e misto	15	5.391,9	6.092,8	5.137,1	5.059,7	2.208,2	34,3	3.183,6	5.426,1
A bacino		119	3.990,4	4.411,9	3.599,5	3.546,0	11.634,5	34,1	-	11.668,6
Ad acqua fluente	nente	1.391	3.759,0	4.519,5	3.444,1	3.364,6	16.289,2	11,2		16.300,4
ITALIA SETTENTRIONALE	NTRIONALE	1.613	16.658,3	18.914,2	15.449,8	15.191,4	37.733,3	157,7	3.183,6	41.074,6
() ()	Normali	6	302,6	372,7	256,4	252,4	466,4	3,1		469,5
A serbatoro	Pompaggio puro e misto			-	-		,	,		
A bacino		42	1.013,7	1.229,8	842,5	830,3	2.300,7	5,6		2.306,3
Ad acqua fluente	nente	226	383,5	461,7	344,2	336,8	1.419,1	0,1	-	1.419,2
ITALIA CENTRALE	ALE	277	1.699,8	2.064,3	1.443,1	1.419,4	4.186,1	8,8	-	4.194,9
() ()	Normali	33	3.693,2	4.162,9	3.353,5	3.302,9	1.759,7	14,0	2.130,0	3.903,7
A serbatolo	Pompaggio puro e misto	9	2.217,3	2.548,0	2.074,0	2.042,9	145,9	1,0	2.094,8	2.241,7
A bacino		25	839,2	6,566	738,9	728,6	1.490,5	0,2	-	1.490,7
Ad acqua fluente	nente	114	398,0	494,3	357,4	350,4	1.318,2			1.318,2
TALIA MERIDI	ITALIA MERIDIONALE E INSULARE	172	4.930,4	5.651,1	4.449,8	4.381,9	4.568,4	14,2	2.130,0	6.712,6
Cictor C	Normali	145	12.904,7	14.518,5	12.016,3	11.836,1	12.035,7	129,6	5.313,5	17.478,8
A serioatoro	Pompaggio puro e misto	21	7.609,2	8.640,8	7.211,1	7.102,6	2.354,1	35,3	5.278,4	7.667,8
A bacino		186	5.843,2	6.635,6	5.180,9	5.104,9	15.425,7	39,9	-	15.465,6
Ad acqua fluente	uente	1.731	4.540,5	5.475,5	4.145,6	4.051,8	19,026,5	11,3	-	19.037,8
Ітапа		2.062	23.288,5	26.629,6	21.342,8	20.992,8	46.487,9	180,7	5.313,5	51.982,1
(*) Impianti a	(*) Impianti a serbatolo sono quelli che hanno un serbatolo classificato come "serbatolo di regolazione" stagionale (durata di invaso maggiore o uguale a 400 ore)	o un serbatoio cl	assificato come "	serbatoio di redo	lazione" stagior	nale (durata di ir	ivaso maggiore o	uauale a 400 ore	(6	

(*) Impianti a serbatolo sono quelli che hanno un serbatolo classificato come "serbatolo di regolazione" stagionale (durata di invaso maggiore o uguale a 400 ore).
(**) Impianti a bacino sono quelli che hanno un serbatolo classificato. "bacino di modulazione" (durata di invaso minore di 400 ore e maggiore di 2 ore).
(***) Impianti ad acqua fluente sono quelli che non hanno serbatolo o hanno serbatolo con durata di invaso uguala o minore di due ore.

La durata di invaso è il tempo necessario per fomire al serbatolo un volume d'acqua pari alla sua capacità utile con la portata media annua del o dei corsi d'acqua che in esso si riversano,

escludendo gli eventuali apporti da pompaggio.

PARTE PRIMA

Cenni teorici di idraulica e idrologia

1. PRINCIPI DI IDRAULICA

1.1. IL TEOREMA DI BERNOULLI

Nell'ambito delle equazioni della dinamica dei fluidi, che forniscono le condizioni di equilibrio cui devono sottostare le varie forze, reali o fittizie, che agiscono su una generica massa fluida in movimento, il teorema di Bernoulli assume una importanza fondamentale per fornire la relazione che deve sussistere fra le diverse forme di energia in gioco.

Innanzitutto, con riferimento alle definizioni dell'idraulica tradizionale, la somma della quota geodetica z e dell'altezza piezometrica p/g è definita come *quota piezometrica*. Se a questi due termini si somma l'altezza cinetica $v^2/2g$, si ottiene il carico totale che si designa usualmente con la lettera H:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Il teorema di Bernoulli afferma che, nel moto permanente di un fluido perfetto pesante incomprimibile, il carico totale H si mantiene costante lungo ogni traiettoria:

$$H(s) = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \cos t$$

dove s è la coordinata curvilinea del punto raggiunto dall'elemento liquido, che scorrendo il tempo, si muove lungo la propria traiettoria.

1.2. DEFINIZIONI FONDAMENTALI

FORZA

Le cause che possono alterare la velocità di un punto materiale, cioè produrre una accelerazione nel suo moto, si chiamano *forze*. L'introduzione del concetto di forza è basato su esperienze eseguite su un unico punto materiale che

hanno evidenziato una proporzionalità fra i vettori forza applicata ed accelerazione conseguita:

$$\vec{F} = \cos t \cdot \vec{a} \tag{1.1}$$

Se si indica con m la massa inerziale, il fattore costante della (1.1) può essere posto pari a $k \cdot m$ essendo k una costante che dipende esclusivamente dal sistema di unità di misura usato e, conseguentemente, la (1.1) si scrive:

$$\vec{F} = k \cdot m \cdot \vec{a} \tag{1.2}$$

La massa inerziale m è una grandezza fisica scalare e la (1.2) costituisce l'espressione del secondo principio fondamentale della dinamica.

In conclusione una forza è necessaria per vincere l'inerzia di un corpo e costringerlo a cambiare il suo stato di moto.

LAVORO

Considerando la relazione fra le forze applicate e gli spostamenti del punto materiale si perviene all'introduzione di una nuova grandezza fisica: il lavoro. L'esperienza fisica ha mostrato che la definizione più razionale e utile per il lavoro è la seguente: se \vec{F} è una forza costante applicata a un punto materiale e si considera uno spostamento rettilineo \vec{s} del punto materiale in una direzione, il lavoro (L) compiuto dalla forza è espresso da:

$$L = \overrightarrow{F} \cdot \overrightarrow{s} = F \cdot s \tag{1.3}$$

essendo il lavoro una grandezza scalare.

Le dimensioni del lavoro sono:

$$[L] = [L^2 M T^{-2}]$$

L'unità di misura dell'energia e del lavoro è il joule, dal nome del fisico James Prescott Joule (simbolo: J), derivato del Sistema Internazionale (SI); è definito come 1 kg · m² · s-² = 1 N · m = 1 W · s.

Un joule è pertanto il lavoro richiesto per esercitare una forza di un newton per una distanza di un metro, perciò la stessa quantità può essere riferita come newton per metro. Un joule è anche il lavoro svolto per produrre la potenza di un watt per un secondo.

Si ha pertanto che 1 joule equivale a:

- $-1 \text{ W} \cdot s$ (watt secondo);
- $-1 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ (newton metro)};$
- 1 Pa ⋅ m³ (pascal metro cubo).

Fra i multipli del joule (si vedano anche i prefissi del Sistema Internazionale di unità di misura) si trovano:

- il kilojoule (kJ), equivalente a 1.000 joule;
- il megajoule (MJ), equivalente a 1.000.000 di joule;
- il gigajoule (GJ), equivalente a 1.000.000.000 di joule;
- il terajoule (TJ), equivalente a 1.000.000.000.000 di joule.

POTENZA

Nelle questioni in cui occorre considerare il lavoro eseguito da una forza ha grande interesse conoscere la rapidità con cui tale lavoro è effettuato.

Se L è il lavoro compiuto da una forza in un certo intervallo di tempo $(t_2 - t_1)$, si definisce potenza media fornita nel detto intervallo dall'ente che realizza le forze (ad esempio una macchina) con la seguente equazione:

$$\overline{W} = \frac{L}{t_2 - t_1} \tag{1.4}$$

Riducendo l'intervallo che si considera si ha al limite la potenza istantanea fornita all'istante *t* dall'ente che realizza la forza:

$$W = \frac{dL}{dt} \tag{1.5}$$

Sostituendo nella (1.5) l'espressione del lavoro si ottiene:

$$W = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} \tag{1.6}$$

essendo F e v i valori istantanei della forza e della velocità.

Le dimensioni della potenza sono le seguenti:

$$[W] = [L^2 M T^{-3}]$$

Il watt (simbolo: W) è l'unità di misura della potenza nel Sistema Internazionale e prende il nome da James Watt per il suo contributo nello sviluppo della macchina a vapore.

Un watt equivale a 1 joule al secondo (1 J/s).

Alcuni dei multipli e sottomultipli più utilizzati del watt sono i seguenti:

- milliwatt (mW) = 0.001 W;
- chilowatt (kW) = 1.000 W;
- megawatt (MW) = 1.000.000 W;

- gigawatt (GW) = 1.000.000.000 W;
- terawatt (TW) = 1.000.000.000.000 W.

Le unità di potenza possono essere usate assieme a quelle di tempo per definire nuove unità di lavoro. Una unità frequentemente usata nella tecnica è il kilowatt-ore (kWh), cioè il lavoro compiuto in un'ora da una macchina che sviluppa una potenza costante di 1 kW. Si ha quindi:

1 kWh = 3600 kW s =
$$3.6 \cdot 10^6$$
 W $s = 3.6 \cdot 10^6$ joule

Quindi una lampadina che assorbe 100 W in due ore consuma 200 Wh (720.000 J).

ENERGIA POTENZIALE

L'energia potenziale U rappresenta la capacità a compiere lavoro dovuta al fatto che un punto materiale occupi una determinata posizione nel campo di forza. La differenza dei valori dell'energia potenziale U in due punti (U_1-U_2) in un campo di forze conservativo è per definizione pari al lavoro fatto dalle forze del campo durante lo spostamento del corpo da P_1 a P_2 lungo una qualsiasi linea C. L'energia potenziale è una grandezza scalare le cui dimensioni sono le stesse di quelle del lavoro:

$$[U] = [L^2 M T^{-2}]$$

Inoltre ogni punto materiale per il solo fatto di essere in moto e di essere dotato di inerzia (*m*) ha una capacità a compiere lavoro. Tale capacità prende il nome di *energia cinetica* ed è espressa da:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \tag{1.7}$$

dove v è la velocità.

1.3. IMPIANTI ELETTRICI

Gli impianti elettrici devono il loro sviluppo non solo alla possibilità e facilità di trasformazione dell'energia elettrica nelle altre forme di energia, ma anche e specialmente all'attitudine che essa ha di essere trasmessa e distribuita con una facilità maggiore di qualunque altra. Così come è possibile frazionare e distribuire con estrema facilità l'energia degli utenti, fin dai punti più remoti e reconditi di una zona, è uso comune configurare il funzionamento in parallelo di centrali appartenenti a sistemi idrici diversi e perciò soggette a regimi diversi, che si integrano a vicenda.

Gli impianti elettrici attuali sono costituiti da raggruppamenti molto complessi di centrali di produzione, diverse per struttura (cioè a seconda del tipo di combustibile sfruttato, delle forze idrauliche a regime alpino o appenninico, della presenza o meno del serbatoio di ritenuta, ecc.) e per funzione (centrali di base, di punta, di riserva, ecc.), eccedenti quasi sempre i limiti di una provincia e spesso anche di una regione, e da raggruppamenti estremamente complessi di apparecchi di utilizzazione con caratteristiche assai diverse fra loro. Interposte fra produzione e consumo si trovano:

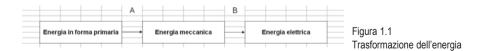
- la rete di distribuzione destinata a frazionare e distribuire agli utenti la potenza elettrica disponibile in una data località;
- le linee di trasmissione che hanno lo scopo di collegare le centrali di produzione alla rete di distribuzione e le centrali stesse fra loro allo scopo di assicurare la regolarità dell'esercizio;
- le sottostazioni di semplice smistamento dell'energia o di trasformazione e di conversione.

Alla trasmissione è inerente il concetto di grandi distanze e di potenza da trasmettere senza frazionamento; alla distribuzione quello di piccole distanze e di grande frazionamento: i due problemi sono analoghi ma ciascuno ha le proprie caratteristiche ed esigenze.

La centrale elettrica realizza la trasformazione in energia elettrica di una energia in forma primaria associata a elementi i quali, sia per il loro combustibile o per lo stato di aggregazione, sia per l'energia cinetica o potenziale da essi posseduta, sono in grado di cedere in modo controllabile energia all'ambiente circostante.

L'energia elettrica può essere prodotta impiegando delle macchine rotanti: tipicamente dinamo ed alternatore.

Ciò comporta la realizzazione di un passaggio intermedio realizzando la trasformazione dell'energia di forma primaria in energia meccanica, secondo lo schema di figura 1.1.



Il tipo di trasformazione che in figura 1.1 è indicato con la lettera B definisce di fatto il tipo della centrale elettrica.

Nella tabella 1.1 vengono elencati i vari tipi di centrale e la fonte di energia alla quale fanno riferimento.

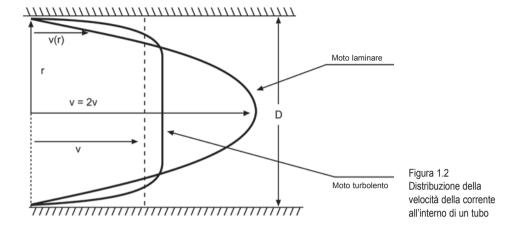
La centrale elettrica si configura dunque come l'impianto che, dopo avere prefissato alcune condizioni (tipo di energia disponibile, parametri elettrici coi quali si vuole realizzare il trasporto dell'energia, l'ubicazione della centrale stessa, ecc.) realizza la generazione di energia elettrica (partendo da una energia di diverso tipo) col massimo rendimento, quest'ultimo inteso ovviamente anche in termini economici.

Tabella 1.1. Tipi di centrale e fonte di energia primaria

Tipo di centrale	Energia primaria
Idroelettrica	Energia potenziale e/o cinetica di una massa di acqua
Termoelettrica	Energia termica ricavabile da elementi combustibili (escluse reazioni nucleari)
Geotermoelettrica	Energia termica e/o cinetica posseduta da vapori e gas che fuoriescono dal sottosuolo
Nucleotermoelettrica	Energia termica ricavata da reazioni nucleari

1.4. Flusso dell'acqua nei tubi

L'energia posseduta dall'acqua defluente sotto una certa pressione in un condotto chiuso di sezione circolare è data dall'equazione di Bernoulli definita nel paragrafo 1.1. Si immagini una corrente d'acqua fatta defluire molto lentamente in un tubo di vetro di piccolo diametro lungo e diritto; se all'estremità di tale tubo si immette una corrente di acqua colorata, questa si presenta come una linea retta attraverso il tubo, non mescolata con l'acqua pura, indicando così che si è in presenza di un moto laminare. L'acqua, cioè, fluisce secondo lamine simili a tanti tubi concentrici di piccolo spessore; il più esterno di questi tubi virtuali aderisce alla parete del tubo reale mentre ciascuno dei tubi interni si muove con velocità via via crescente fino a divenire massima al centro del tubo. La distribuzione della velocità ha la forma di un paraboloide di rivoluzione e la velocità media (figura 1.2) è il 50% della massima velocità, che è raggiunta sull'asse. Se si provoca un aumento graduale della velocità della corrente, si giunge a un punto in cui il filetto colorato si frantuma improvvisamente e si mescola con l'acqua circostante. Le particelle d'acqua vicine alla parete si mischiano con quelle nel mezzo del tubo, che si muovono più veloci, e le rallentano. In questo istante il moto diventa turbolento e la distribuzione della velocità diviene più piatta. Reynolds, verso la fine del secolo scorso, trovò, tramite esperimenti, che la transizione tra il moto laminare e quello turbolento dipende non solo dalla velocità, ma anche dal diametro del tubo e dalla viscosità del fluido e può essere descritta mediante il rapporto tra la forza di inerzia e quella viscosa. Questo rapporto è noto oggi come numero di Reynolds.



1.4.1. Numero di Reynolds

Il numero di Reynolds N_R può essere espresso per un tubo circolare dalla seguente relazione:

$$N_R = \frac{D \cdot V}{V} \tag{1.8}$$

dove

D = diametro del tubo

V = velocità media dell'acqua

v = viscosità cinematica del fluido, pari per l'acqua alla temperatura di 20° a $1,31 \cdot 10^{6}$.

Il numero di Reynolds può considerarsi come un indice del grado di turbolenza cui è assoggettato il fluido: si ha moto viscoso per valori relativamente piccoli del numero di Reynolds, il moto puramente turbolento per valori molto elevati, mentre per valori intermedi ci si trova nella zona di transizione. Questi ragionamenti inducono a supporre che un particolare valore del numero di Reynolds, indipendente dalla natura del fluido e dalle dimensioni del condotto, purché cilindrico circolare, contraddistingua il primo insorgere della turbolenza, e cioè quelle condizioni di instabilità messe in evidenza dalla esperienza dello stesso Reynolds e caratterizzate dal primo comparire di qualche ondulazione nelle traiettorie originariamente rettilinee del moto regolare. Tale supposizione è stata sicuramente confermata da numerose serie di determinazioni sperimentali; si è trovato precisamente che il valore del numero di Reynolds per cui si verifica il trapasso è all'incirca pari a 2000.

Tale valore viene definito *valore critico*, mentre è detta *stato critico* la situazione di movimento da esso individuata.

1.4.2. Perdite di carico dovute all'attrito

Darcy e Weisback hanno ricavato per un fluido incomprimibile in moto stazionario all'interno di un tubo la seguente espressione per quanto concerne le perdite di carico, h_t , dovute all'attrito:

$$h_f = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \frac{V^2}{2g} \tag{1.9}$$

dove

f = fattore di attrito (numero adimensionale)

L = lunghezza del tubo

V = velocità media

 $g = \text{accelerazione di gravità } (9,81 \text{ m/s}^2).$

In un tubo idraulicamente liscio il fattore di attrito f non è influenzato dalla scabrezza superficiale del tubo e per questa situazione Von Karman sviluppò la seguente relazione per il calcolo di f:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log_{10} \left(\frac{N_R \cdot \sqrt{f}}{2.51} \right) \tag{1.10}$$

Per elevati valori del numero di Reynolds, lo spessore dello strato laminare diviene molto piccolo e il fattore d'attrito f è indipendente da N_R e funzione solo dell'altezza relativa della scabrezza. In questo caso il tubo è idraulicamente scabro e, secondo Von Barman, il fattore d'attrito ha un valore di:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log_{10} \left(3, 7 \cdot \frac{D}{e} \right) \tag{1.11}$$

All'interno di questi due casi estremi il tubo non si comporta né come completamente liscio né come completamente scabro. Colebrook e White hanno fornito, per questo caso intermedio, la seguente equazione:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{N_R \sqrt{f}} \right)$$
 (1.12)

Tabella 1.2. Valori dell'altezza della scabrezza, e, per i diversi tubi commerciali

Materiale	e [mm]
Polietilene	0,003
Fibra di vetro con rivestimento epossidico	0,003
Acciaio non saldato (nuovo)	0,025
Acciaio non saldato (leggera ruggine)	0,250
Acciaio non saldato (galvanizzato)	0,150
Acciaio saldato	0,600
Ghisa (rivestita con smalto)	0,120
Cemento amianto	0,025
Legno in doghe	0,600
Calcestruzzo (casseri in acciaio e giunti lisciati)	0,188

CALCOLO DELLE PERDITE PER ATTRITO DI UN TUBO (EQUAZIONE DI COLEBROOK-WHITE)

Portata	q =	1.2	m³/s
Diametro	D =	900	mm
Velocità	V =	1.8863	m/s
Lunghezza del tubo	L =	500	m
Numero di Reynolds	N _R =	1295918	
Altezza della scabrezza	e =	0.6	mm
Scabrezza/Diametro	e/D =	6.6667E-04	
Fattore di attrito	f =	0.0182	
Viscosità cinematica	ν =	1.31E-06	
Perdita di carico	h _f =	1.8290	m

f alpha alpha
0.025 6.32455532 7.43145489
7.43145489 7.42183128
7.42183128 7.42191449
7.42191449 7.42191377
7.42191377 7.42191378
7.42191378 7.42191378

Diagramma di Mooby

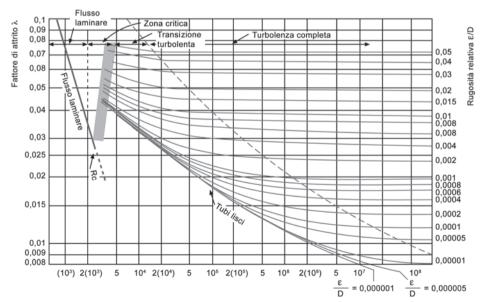


Figura 1.3 Diagramma di Moody

Numero di Raynolds R

dove e è l'altezza della scabrezza i cui valori in funzione dei diversi tipi di materiale sono riportati nella tabella 1.2.

L'equazione proposta da Colebrook e White non è semplice da risolvere manualmente. Una alternativa è costituita dall'utilizzo dell'abaco di Moody (figura 1.3), che permette di ricavare il valore di f una volta noto i valori di N_R e di e/D.

In alternativa per risolvere l'equazione di Colebrook e White è possibile effettuare un calcolo iterativo mediante un foglio elettronico.

In figura 1.3 si riporta un foglio Excel che calcola la perdita di carico h_f per un tubo in acciaio saldato del diametro di 900 mm, della lunghezza di 500 m convogliante una portata di 1,2 m³/s.

La formula di Colebrook e White può essere usata per risolvere quasi tutti i problemi di moto in tubi circolari. Ad esempio un altro interessante problema è quello di calcolare la massima velocità dell'acqua defluente in un tubo di diametro D e lunghezza L senza superare un valore delle perdite di carico. In questo caso si utilizza una variabile indipendente μ così definita:

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot f \cdot N_R^2 \tag{1.13}$$

sostituendo l'espressione (1.8) relativa al numero di Reynolds ed il valore di f dato dalla (1.9), il valore di μ diviene:

$$\mu = \frac{g \ D^3 \ h_f}{L \ v^2} \tag{1.14}$$

dove tutti i parametri sono noti.

Una volta calcolato il valore di μ , si ricava f dalla (1.13) e lo si sostituisce nella (1.12) ottenendo:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{N_R \sqrt{f}} \right)$$
 (1.15)

ottenendo:

$$N_{R} = -2\sqrt{2\mu} \cdot \log_{10} \left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{\sqrt{2 \cdot \mu}} \right)$$
 (1.16)

Con questa equazione è possibile tracciare l'andamento di N_R in funzione di μ per diversi valori del parametro e/D come mostrato nella figura 1.4 (dove

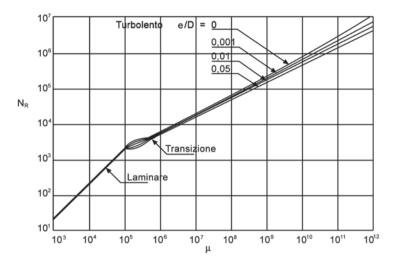


Figura 1.4 Andamento di N_R in funzione di μ

sulle ascisse sono riportati i valori di μ mentre sulle ordinate i valori di N_R), del tutto simile all'abaco di Moody nel quale N_R può essere stimato direttamente.

Anche queste formule possono essere implementate in un foglio elettronico. In tabella 1.3 si riportano i risultati per quanto concerne il problema di stimare una portata d'acqua che a 10°C provoca una perdita di carico di 2 m per km in un tubo d'acciaio saldato di 1,5 m di diametro.

Tabella 1.3. Esempio di calcolo della portata Q

Perdita di carico per km h _f =	2	m
Diametro tubo D =	1.5	m
Lunghezza della condotta L =	1000	m
Altezza della scabrezza e =	0.6	mm
Viscosità cinematica del fluido v =	1.31E-06	m²/s

$$\mu$$
 = 3.90E+10
 N_R = 2.20E+06
 V = 1.92 m/s
 Q = 3.39 m³/s

Un'altra formula empirica per calcolare le perdite di carico è quella sviluppata da Manning, ampiamente utilizzata per i canali a pelo libero ma applicabile anche per condotti chiusi:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{P^{2/3}}$$

dove

n = coefficiente di scabrezza di Manning

 $P = \text{perimetro bagnato } [\text{m}^2]$

 $A = \text{sezione trasversale del tubo } [\text{m}^2]$

S = gradiente idraulico ovvero le perdite di carico per unità di lunghezza del condotto.

Questa formula applicata a un tubo circolare completamente pieno di acqua diventa:

$$S = \frac{10,29 \cdot n^2 \cdot Q^2}{D^{5,333}}$$

Nella tabella 1.4 sono riportati i valori del coefficiente n di Manning per alcuni tubi commerciali.

3 P		
Tipo di tubo	n	
Acciaio saldato	0,012	
Polietilene (PE)	0,009	
PVC	0,009	
Cemento amianto	0,011	
Ghisa sferoidale	0,015	
Ghisa	0,014	
Legno in doghe (nuovo)	0,012	
Calcestruzzo (casseri in acciaio e giunti lisciati)	0,014	

Tabella 1.4. Coefficienti n di Manning per alcuni tubi commerciali

Calcolando con la formula di Manning la stessa perdita di carico h_f già calcolata con la formula di Colebrook per un tubo in acciaio saldato del diametro di 900 mm, della lunghezza di 500 m convogliante una portata di 1,2 m³/s, adottando un valore di n = 0,012 (tubo in acciaio saldato) si ottiene:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{10,29 \cdot 0,012^2 \cdot 1,2^2}{0,9^{5,333}} = 0,00374$$

Per L = 500 m si ottiene $h_f = 1,87$, valore di poco superiore a quello ottenuto con l'equazione di Colebrook e White mediante foglio di calcolo Excel.

1.4.3. Perdite dovute alla turbolenza

L'esperienza dimostra che l'acqua defluente in un tubo con imbocchi, curve, brusche contrazioni ed espansioni, griglie, valvole ed altri accessori, è soggetta,

oltre che a perdite per attrito, a perdite d'energia dovute alla viscosità intrinseca del fluido. Anche questo tipo di perdite dipende dalla velocità ed è espresso da un coefficiente sperimentale K che moltiplica l'altezza cinetica $V^2/2g$.

1.4.3.1. Perdite attraverso le griglie

All'imbocco di un tubo è sempre necessaria una griglia, il che dà sempre origine a una perdita di carico. Sebbene in generale sia modesta, essa può essere calcolata con la seguente formula di Kirchmer:

$$h_{t} = K \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \left(\frac{V_{0}^{2}}{2g}\right) \operatorname{sen} \phi$$

dove i parametri sono mostrati nella figura 1.5.

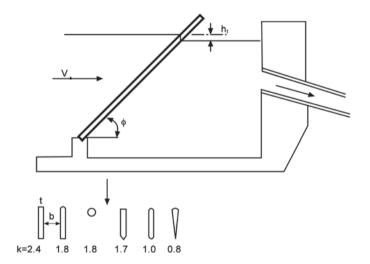


Figura 1.5 Schema e indicazioni per il calcolo delle perdite di carico attraverso le griglie

Se la griglia non è perpendicolare, ma forma un angolo β con la corrente (β avrà il valore massimo di 90° per una griglia posta lateralmente a un canale) vi sarà un ulteriore perdita di carico data da:

$$h_{\beta} = \left(\frac{V_0^2}{2g}\right) \operatorname{sen} \beta$$

1.4.3.2. Perdita di carico per brusca contrazione o espansione

Quando un tubo presenta una brusca contrazione si determina una perdita di carico dovuta all'aumento della velocità dell'acqua e alla turbolenza. Le traiettorie della corrente sono così complesse che, almeno per ora, è impossibile

fare un'analisi matematica del fenomeno. La perdita di carico si stima moltiplicando l'altezza cinetica nel tubo più piccolo per un coefficiente K che varia con l'indice di contrazione d/D secondo quanto mostrato nella figura 1.6:

$$h_c = K \cdot \left(\frac{V_2^2}{2g}\right)$$

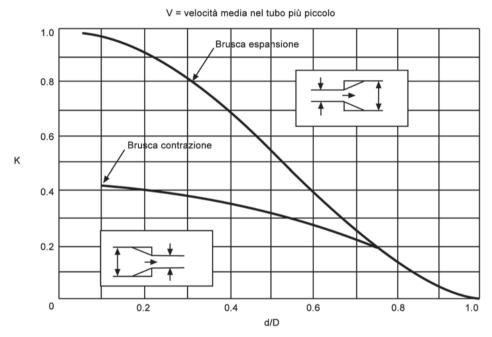


Figura 1.6 Valori di *K* per calcolare la perdita di carico per contrazione o espansione

La perdita di carico può essere ridotta utilizzando un tronco di tubo a diametro variabile, chiamato *convergente* per la contrazione, o *diffusore* per l'espansione. Nei convergenti le perdite dipendono dall'angolo, come appare dalla tabella 1.5 dove sono riportati i valori sperimentali di K'_c .

Tabella 1.5. Valori di K', per diversi angoli del convergente

Angolo	K _c
30°	0,02
45°	0,04
60°	0,07

Nel diffusore l'analisi del fenomeno è più complessa. La figura 1.7 mostra i valori di K_{ex} trovati sperimentalmente per diversi angoli di diffusore. La perdita di carico è data da:

$$h'_{ex} = K'_{ex} \cdot \frac{V_1^2 - V'_2}{2g}$$

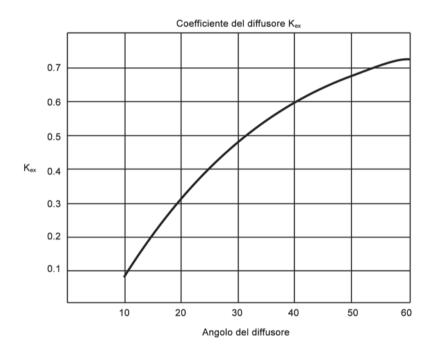


Figura 1.7 Valori di K_{ex}

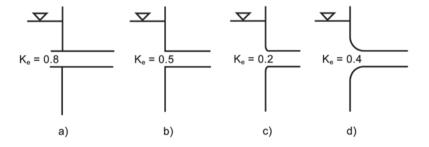


Figura 1.8 Valori di *K*_e

Un tubo sommerso che scarica in un serbatoio è un caso estremo di brusca espansione, dove V_2 , date le grandi dimensioni del serbatoio rispetto a quelle del tubo, può essere posta pari a zero e la perdita è pari a $V_1/2g$.

Viceversa, l'imbocco di un tubo è il caso estremo di brusca contrazione. La figura 1.8 mostra il valore K_e per il quale moltiplicare l'altezza cinetica $V^2/2g$ nel tubo.

1.4.3.3. Perdite di carico nelle curve

L'esperienza ha messo in luce che lungo una curva si verifica un aumento di pressione lungo la parete esterna e una diminuzione lungo quella interna, il che provoca una corrente secondaria del tipo di quella mostrata in figura 1.9. I due movimenti simultanei – il flusso longitudinale e la corrente secondaria – producono un moto a spirale che in un tronco di tubo lungo circa cento diametri è dissipato per attrito viscoso.

In queste circostanze le perdite di carico dipendono dal raggio della curva e dal diametro del tubo. Inoltre, la presenza di una circolazione secondaria induce delle perdite per attrito secondarie, anch'esse dipendenti dalla scabrezza relativa e/d.

La figura 1.9 fornisce il valore di K_b (coefficiente per calcolare le perdite di carico nelle curve) per diversi valori del rapporto R/d e per vari valori della scabrezza relativa e/d.

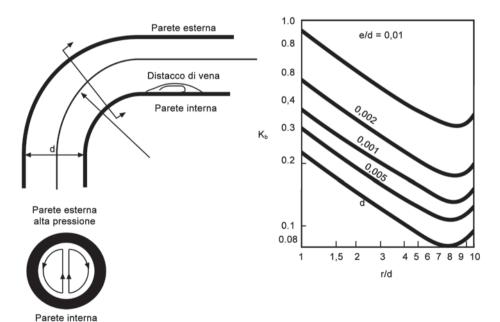


Figura 1.9 Valori di K_b per stimare le perdite di carico nelle curve

bassa pressione

1.4.3.4. Perdite di carico attraverso valvole

Le valvole o le paratoie sono utilizzate per isolare un componente dal resto dell'impianto così, solitamente, esse si presentano o tutte aperte o tutte chiuse. La regolazione delle portata è affidata alle pale del distributore o alle spine delle turbine. Le perdite di carico indotte dal passaggio attraverso una valvola aperta dipendono dal tipo e dalla conformazione costruttiva della valvola. La figura 1.10 mostra il valore K_{ν} (coefficiente per calcolare le perdite di carico attraverso le valvole) per differenti tipi di valvole.

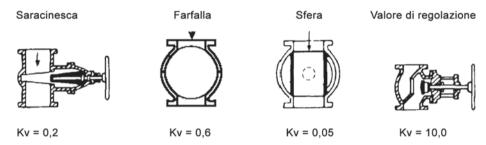


Figura 1.10 Valori di K_{ν} per stimare le perdite di carico attraverso le valvole

1.5. MOTO NEI CANALI A PELO LIBERO

Le correnti a pelo libero sono caratterizzate dall'avere una parte della loro superficie di contorno, e precisamente quella superiore, non a contatto con una parete solida, ma con un gas, che nella più grande generalità dei casi è l'atmosfera; questa superficie, detta *superficie libera* o *pelo libero*, è pertanto una superficie isobarica (p =costante).

In questo caso, per definizione, il moto è uniforme quando:

- l'altezza d'acqua, l'area bagnata e la velocità sono costanti in ogni sezione del canale;
- la linea dei carichi totali, la superficie libera e il fondo del canale sono paralleli tra loro.

Basandosi su questi principi Chezy ha trovato la seguente legge del moto uniforme:

$$V = C \cdot \sqrt{Ri} \tag{1.17}$$

dove

C = fattore di resistenza di Chezy

R = raggio idraulico della sezione del canale

 i = gradiente idraulico (pendenza della superficie libera) che nel caso di moto uniforme è pari alla pendenza di fondo del canale.

Molti esperimenti sono stati condotti per determinare il valore di C. Manning, utilizzando i risultati di esperimenti condotti sia in prima persona sia da altri, derivò la seguente relazione empirica:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6} \tag{1.18}$$

dove n è il coefficiente di scabrezza di Manning i cui tipici valori sono riportati nella tabella 1.6.

Tabella 1.6. Valori tipici del coefficiente di Manning

Tipo	di canale	Numero di Manning
Canali in terra	Pulito	0,022
	Ghiaia	0,025
	Inerbito	0,030
	Ciottoli, sassi	0,035
Canali artificiali rivestiti	Ottone	0,011
	Acciaio saldato	0,012
	Acciaio verniciato	0,014
	Acciaio chiodato	0,015
	Ghisa	0,013
	Calcestruzzo lisciato accuratamente	0,012
	Calcestruzzo non lisciato	0,014
	Legno piallato	0,012
	Mattonelle	0,014
	Laterizio	0,015
	Asfalto	0,016
	Metallo corrugato	0,022
	Muratura in breccia	0,025

Sostituendo l'espressione di C data dalla (1.18) nella (1.17) si ottiene la seguente formula di Manning per il moto uniforme:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{1/3} \cdot i^{1/2} \tag{1.19}$$

o, in alternativa: