



POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Analisi delle problematiche idriche a Bankondji in
Camerun**

Relatrice:

Ilaria Butera

Correlatori:

Ing. Michele Pagano

Ing. Serge Noubondieu

Laureanda:

Valeria Bitritto

Anno Accademico 2020/2021



INDICE

INTRODUZIONE	1
1. ESAME DELLE PROBLEMATICHE IDRICHE	2
1.1 L' ACCESSO AD ACQUA POTABILE	2
1.2 POTENZIALE IDROELETTRICO	4
2. IL CASO DI STUDIO	8
2.1 LA LOCALITÀ DI BANKONDJI	8
2.2 IL CONTESTO SOCIALE	9
2.3 GLI ASPETTI ANALIZZATI	11
3. IL SISTEMA DI APPROVVIGIONAMENTO DI ACQUA POTABILE	12
3.1 LA COOPERAZIONE TRA DANIMARCA E CAMERUN	12
PRINCIPALI MOTIVAZIONI DEL FALLIMENTO.....	13
3.2 LA COLLABORAZIONE TRA ARCS E L'ASSOCIAZIONE CAMERUNENSE CODEBANK 2000.....	14
ARCS	14
CODEBANK 2000.....	15
IL RAFFORZAMENTO DELLE CAPACITÀ DI AUTOGESTIONE E DEI PROCESSI DI SVILUPPO A LIVELLO LOCALE	16
3.3 LA RETE IDRICA DI BANKONDJI.....	17
LE FONTI D'ACQUA.....	18
LE FONTI ENERGETICHE E POMPE	21
IL SISTEMA DI POTABILIZZAZIONE	23
LA RETE DI DISTRIBUZIONE	24
3.4 POSSIBILI INTERVENTI DI RISANAMENTO	27
4. IL MICRO IDROELETTRICO	28
4.1 L' IMPIANTO IDROELETTRICO	29
LA CAPTAZIONE	30
LA VASCA DI SEDIMENTAZIONE.....	31
LA CONDOTTA DI ADDUZIONE.....	32
LA VASCA DI CARICO.....	32



LA CONDOTTA FORZATA	34
IL LOCALE TECNICO	34
4.2 LA TURBINA ESISTENTE	35
4.3 LA CONDOTTA FORZATA	37
VERIFICA IDRAULICA	38
POSSIBILI INTERVENTI SULLA CONDOTTA FORZATA	40
4.4 ANALISI TECNICA DI NON FUNZIONAMENTO DELLA TURBINA	50
4.5 LA SCELTA DELLA TURBINA.....	55
SALTO NETTO.....	55
PORTATA	56
NUMERO DI GIRI CARATTERISTICO	57
VELOCITÀ DI ROTAZIONE	57
CAVITAZIONE	58
VELOCITÀ DI FUGA.....	59
TURBINE AD AZIONE	60
TURBINE A REAZIONE.....	63
TSCHURTSCHENTHALER TURBINENBAU	66
MISA.....	70
4.6 SCENARI DI UTILIZZO	75
5. ANALISI DEI COSTI DELL’IMPIANTO.....	80
CONCLUSIONE	83
APPENDICE A.....	84
SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA.....	94
RINGRAZIAMENTI	95



INTRODUZIONE

L'accesso all'acqua potabile nelle zone rurali, in Camerun, è una situazione allarmante. Senza ingenti investimenti economici e riabilitando vecchi sistemi idrici, è possibile fornire acqua potabile a molti villaggi del Camerun.

In Camerun nel villaggio di Bankondji, nel cuore della verdeggiante regione dell'ovest, ARCS, in partenariato con l'associazione locale Codebank 2000 (Comité de developpement de Bankondji 2000), ha avviato un progetto finanziato nel 2012 dalla Delegazione dell'Unione Europea a Yaoundè. L'obiettivo principale del progetto è stato riabilitare la stazione Scanwater di Bankondji, evitando il motivo principale per cui le stazioni Scanwater hanno sperimentato un fallimento evidente in Camerun, ovvero la difficoltà degli abitanti del villaggio a mantenere queste strutture. Bankondji è caratterizzato dal clima tipico camerunense: una lunga stagione delle piogge da metà marzo a metà novembre e una breve stagione secca da metà novembre a metà marzo. Difatti è stata utilizzata l'energia fotovoltaica e idroelettrica come fonte di energia per l'alimentazione di pompe sommergibili e pompe dosatrici di cloro del sistema di acqua potabile. L'impianto idroelettrico, a causa dell'inadeguatezza della condotta forzata e della turbina, è inutilizzabile, comportando disagi alla popolazione locale di Bankondji. L'elaborato è volto ad analizzare le problematiche presenti oggi legate all'impianto.

L'analisi e sviluppo di questo argomento, è legato al mio interesse verso le problematiche idriche dei Paesi poveri. Vi è un legame stretto tra povertà e accesso alle risorse idriche, la motivazione è che lo sfruttamento e la distribuzione di acqua richiede un investimento ed inoltre la mancanza di accesso alla risorsa, limita lo sviluppo economico.

L'obiettivo di questo elaborato è quello di considerare e analizzare diverse soluzioni per porre rimedio a problemi sia riguardanti l'equipaggiamento elettromeccanico dell'impianto di approvvigionamento di acqua potabile, e sia relativi all'impianto idroelettrico. Il ripristino dell'impianto micro-idroelettrico, porterebbe sia all'utilizzo di una fonte energetica durante il periodo delle piogge, sia a fornire elettricità al paese migliorandone le condizioni di vita.

Prima di effettuare un'analisi economica nell'ultimo capitolo dell'elaborato, è stata presentata sia la rete idrica e l'impianto idroelettrico di Bankondji. Successivamente l'elaborato presenta le diverse soluzioni sia per quanto riguarda la condotta forzata e sia la turbina, in merito alla disponibilità dei produttori.

1. ESAME DELLE PROBLEMATICHE IDRICHE

1.1 L' ACCESSO AD ACQUA POTABILE ¹

Il 71% della superficie terrestre è coperto di acqua, di cui il 97% è salata, il rimanente 3% è acqua dolce presente in ghiacciai e nevi perenni (68,9%), falde sotterranee (29,9%) e acque superficiali. Solamente una piccolissima percentuale è accessibile all'uomo.

“Secondo il Pacific Institute (The world's water 2008-2009,2009), le risorse idriche di acqua dolce rinnovabile nel 2006 erano di 55.096,9 km³ distribuite nei vari continenti come segue: 5723,5 km³ in Africa, 7620,8 km³ nell'America Settentrionale e Centrale, 17.139,7 km³ in America Meridionale, 15.378,2 km³ in Asia, 7565,4 km³ in Europa e 1669,3 km³ in Oceania. Da questi dati generali si può notare che la distribuzione delle risorse idriche rinnovabili non è omogenea, in particolare se si riferisce alle aree più densamente popolate.”

Pur prelevando solo una piccola percentuale delle risorse idriche rinnovabili, la popolazione mondiale affronta una crisi idrica. Il principale motivo di questa situazione è il difficile accesso alle risorse sia per la loro distribuzione non omogenea, per la crescita demografica, per la povertà, il clima e l'inquinamento, i conflitti per il controllo delle risorse e le scelte politiche e tecnologiche. “Nel novembre 2002 il Committee on economic, social and cultural rights (CESCR) delle Nazioni Unite ha dichiarato che l'accesso ad adeguate quantità di acqua potabile per uso personale e domestico è un diritto fondamentale per tutta la popolazione mondiale. L'accesso all'acqua è un diritto umano indispensabile per condurre una vita dignitosa ed è un prerequisito per la realizzazione di altri diritti, inclusi quelli per la salute, la casa e il cibo (CESCR, Substantive issues arising in the implementation of the international covenant on economic, social and cultural rights. General comment n. 15,2002).”

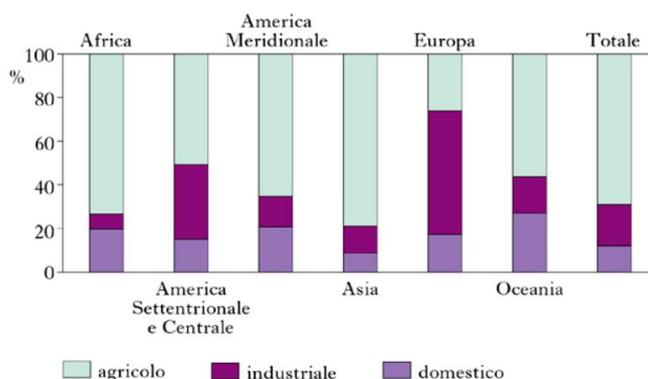


Figura 1.1 – Uso della risorsa idrica nei diversi continenti – Fonte: L'oro blu: la battaglia per l'acqua-Treccani

¹ Giorgio Cancelliere – XXI Secolo (2010) - L'oro blu: la battaglia per l'acqua



La figura 1.1 è il risultato dell'elaborazione dei dati del Pacific Institute: il 70% delle risorse idriche accessibili all'uomo è destinata all'agricoltura, il 18% all'industria e solamente il 12% all'uso domestico. I continenti che nel 21° secolo utilizzeranno maggiormente la risorsa idrica per l'uso agricolo, saranno Africa e Asia.

Nei paesi poveri come l'Africa e l'Asia, a causa dell'allarme idrico, il settore più a rischio rimane l'agricoltura. L'international Food policy (IFRPRI) afferma che entro il 2025 il fabbisogno di acqua aumenterà oltre il 50% e, nei paesi a basso reddito, gli agricoltori saranno i più colpiti.

Lo sfruttamento e la distribuzione dell'acqua richiede un investimento, che risulta oneroso per i Paesi poveri e la mancanza di acqua non permette il loro sviluppo economico. Inoltre bisogna considerare anche i costi per il trattamento e lo smaltimento delle acque, per non essere un possibile veicolo di malattie. Nei Paesi a basso reddito, la distribuzione di acqua potabile dipende dagli aiuti internazionali o fondi governativi. Le zone più popolate ma con minor accesso all'acqua, sono l'Africa subsahariana e l'Asia orientale e meridionale.

Per Africa subsahariana si intende la parte del continente africano situato a sud del Deserto del Sahara, ci sono 48 nazioni nella regione tra cui la Repubblica del Camerun. Il Camerun è uno dei paesi africani più ricchi d'acqua sia nel sottosuolo che in superficie.

L'accesso all'acqua potabile nelle zone rurali, in Camerun, è una situazione allarmante. Secondo alcune statistiche, l'accesso all'acqua potabile è solamente del 33% nella regione dell'Ovest del Camerun (zona in cui è localizzata Bankondji). Questa situazione comporta un'altissima diffusione di malattie idriche e un elevato tasso di mortalità infantile.

Senza ingenti investimenti economici e riabilitando vecchi sistemi idrici, è possibile fornire acqua potabile a molti villaggi del Camerun.



1.2 POTENZIALE IDROELETTRICO ²

L'energia idroelettrica è una delle forme di energia rinnovabili più utilizzate, fornendo circa il 20% del consumo mondiale di elettricità. Questa fonte di energia si basa sul movimento dell'acqua: quando l'acqua cade per forza di gravità trasforma l'energia potenziale in energia cinetica. Questa energia cinetica comporta la rotazione di pale delle turbine idrauliche che trasforma l'energia cinetica in energia meccanica. Infine, la turbina fa girare il rotore del generatore che poi converte questa energia meccanica in energia elettrica.

L'Africa centrale possiede un importante potenziale di energia rinnovabile, presenta sia fonti idroelettriche, solari e biomasse.

L'Africa Centrale (Camerun, Repubblica Centrafricana, Gabon, Repubblica del Congo, Ciad, Guinea Equatoriale e Repubblica democratica del Congo) è localizzata alla latitudine 13°S e 22°N e alla longitudine 8°E e 22°O.

L'Africa Centrale è una regione con un enorme potenziale di energia rinnovabile, dove è possibile individuare tutte le fonti di energia rinnovabile. La regione possiede il più grande potenziale idroelettrico del continente, la seconda foresta tropicale più grande del mondo e una significativa radiazione tutto l'anno. Nonostante la disponibilità territoriale, presenta scarsi livelli di utilizzo dell'energia rinnovabile.

Nome	Capitale	Ufficiale le lingue	Area (km ²)	Popolazione
Angola	Luanda	portoghese	1.246.700	20.609.294
Camerun	Yaoundé	Francese, inglese	475.442	20.129.878
Centroafricano Repubblica	Bangui	Sango, francese	622.984	4.576.000
Chad	N'Djamena	francese, arabo	1.284.000	11.274.106
Repubblica Democratica del Congo	Kinshasa	francese	2.344.858	69.575.000
Repubblica del Congo	Brazzaville	francese	342.000	4.366.266
Guinea Equatoriale	Malabo	Spagnolo, francese	28.051	740.000
Gabon	Libreville	francese	267.668	1.576.665
Totale				132.847.209

Tabella 1.1 - Dati sull'Africa centrale – Fonte: Renewable and Sustainable Energy Reviews

² SCIENCEDIRECT - Renewable and Sustainable Energy Reviews (2015)

SCIENCEDIRECT - Methodology of Feasibility Studies of Micro – Hydro power plants in Cameroon: Case of the Micro –hydro of KEMKEN (2017)

RESEARCH ARTICLE - Barriers related to the deployment of renewable energies in Cameroon and ways to strengthen policies (2019)

Il Camerun è un paese dell’Africa centrale, circondato dalla Nigeria a ovest, dalla Repubblica del Ciad a nord, dalla Repubblica centrafricana a est e dal Gabon a sud.

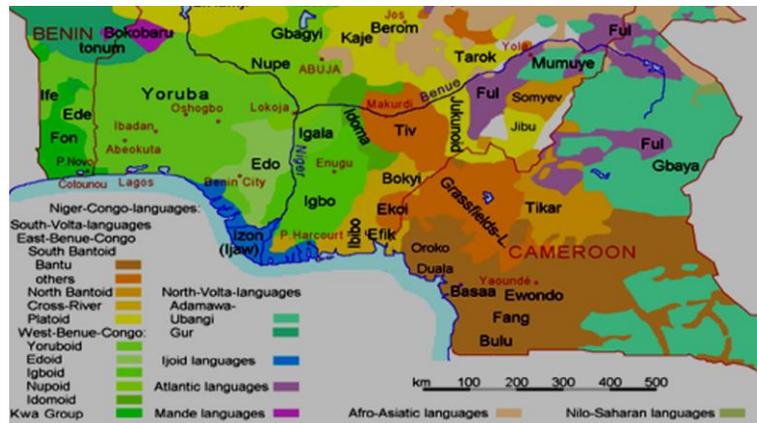


Figura 1.2 – La mappa del Camerun – Fonte.: Renewable and Sustainable Energy Reviews

Nel 2012 il tasso di accesso all’elettricità in Camerun era del 49% e inferiore al 20% nelle zone rurali. Questo paese ha un grande potenziale idroelettrico, ma spesso vengono solamente sviluppate grandi centrali elettriche, non considerano siti favorevoli alla costruzione di MHPP (Mini Hydro Power Project) che potrebbero soddisfare l’esigenza di elettricità nelle zone rurali e contribuire allo sviluppo sostenibile.

Il potenziale idroelettrico del Camerun è stato stimato nel 2015 di 23 GW con una produzione di 103 TW all’anno, ma rimane inutilizzato. Le principali centrali idroelettriche del Camerun sono Song –Loulou (384 MW), Edea (264 MW) e Lagdo (72MW). Le prime due sono costruite sul fiume Sanaga (fiume più lungo del Camerun 718 km).

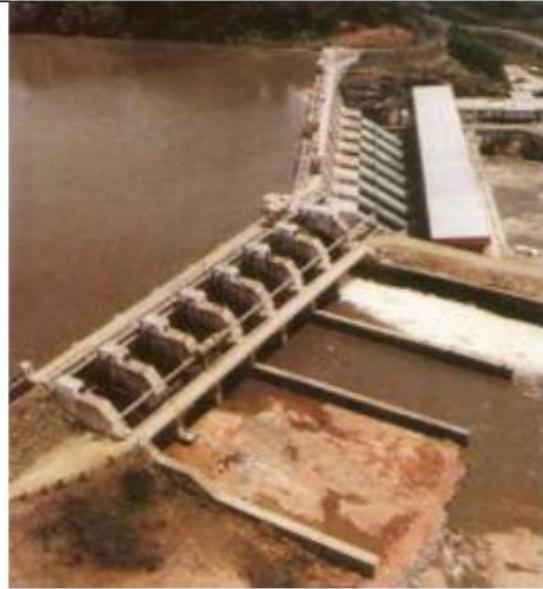


Figura 1.3 – Centrale Edea vista dall'alto



Figura 1.4 - Centrale Lagdo



Figura 1.5 – Centrale Song-Loulou vista dall'alto

La produzione di energia elettrica fornita dalle tre grandi dighe, rappresenta il 58% della capacità totale installata del Paese. Inoltre, sono state costruite altre tre dighe che hanno una capacità totale di 7600 milioni di metri cubi, ovvero Mape, Mbakaou e Bamendjin.

Ci sono diversi punti deboli nel processo di gestione delle risorse rinnovabili in Camerun. La mancanza di un quadro gestionale adeguato a queste energie, la mancanza di una visione di sviluppo sostenibile di questo settore, lentezza amministrativa e cattiva conduzione. La popolazione, originaria di più di 200 gruppi etnici e regolarmente distribuita nelle 10 regioni del



Paese, vive ancora in aree rurali al di sotto della soglia di povertà. Questa situazione rivela un basso tenore di vita, la mancanza di tecniche di comunicazioni efficaci e soprattutto la mancanza di competenze. Ciò riflette l'incapacità del paese di svolgere le attività di ricerca e sviluppo di nuove tecnologie adatte alle energie rinnovabili.

Alcuni suggerimenti per implementare le fonti rinnovabili sono:

- Applicare la politica energetica a livello regionale;
- Promuovere e sviluppare il commercio di energia e servizi ausiliari;
- Aumentare l'accesso all'energia pulita tra le popolazioni e ridurre la povertà;
- Creare un mercato energetico regionale libero e migliorare l'affidabilità del sistema energetico e la qualità dell'approvvigionamento nell'intera regione;
- Avviare progetti pilota finanziati per aiutare a sviluppare il mercato dell'energia sostenibile;
- Creare quadri normativi e politici favorevoli;
- Promuovere finanza e modelli di business innovativi per attivare il settore privato;
- Sviluppare e supportare le reti di decisione politica a livello regionale con iniziative nel campo dell'efficienza energetica, della regolamentazione dell'energia sostenibile, delle energie rinnovabili e di un comitato di regolamentazione regionale.

2. IL CASO DI STUDIO

2.1 LA LOCALITÀ DI BANKONDJI

Bankondji è un villaggio situato nel distretto di Bafang, nel circondario di Haut-Nkam, regione occidentale del Camerun. Tutto il paese è sotto l'autorità di un capo villaggio, che provvede per il buon funzionamento del villaggio assicurando il rispetto delle istituzioni nazionali e il rispetto delle tradizioni ancestrali garantendone la loro trasmissione.



Figura 2.1 – Località di Bankondji Fonte: Google Earth

Bankondji è situato a sud del grande altopiano di Bamileke. Il paesaggio è costituito da colline, bassi altopiani e una pianura vulcano – alluvionale nella zona Kouma. Il suolo moderatamente fertile, è composto da terre ferralitiche rosse e antichi basalti. La sua vegetazione è dominata da una savana erbosa e i principali fiumi sono Tchomedjieu, ShiNku, ShiNkok con le cascate di Hounkok e Nsiasia.

Bankondji è situato nel dominio equatoriale, con un'altitudine media di 1400 metri e appartiene agli altopiani del Camerun occidentale. È caratterizzato dal clima tipico camerunense: fresco, umido e con una sovrabbondanza di piogge, le quali cadono per circa 9 mesi all'anno.

Le precipitazioni sono ampiamente influenzate dalla sua altitudine. Si osservano due stagioni: una lunga stagione delle piogge da metà marzo a metà novembre e una breve stagione secca da metà novembre a metà marzo. La stagione secca non significa assenza di pioggia, ma un periodo in cui piove meno. Durante il periodo dal 1980 al 1922, le precipitazioni annuali oscillavano tra 1500 e

2000 millimetri, con una media di 1590 mm, per 160 giorni di pioggia all'anno. I dati pluviometrici considerati, sono generici e riguardanti l'intera regione.

Le temperature oscillano tra i 15 °C e i 28 °C in media, con una forte variazione giornaliera soprattutto durante la stagione secca. I venti sono deboli, le nebbie frequenti nelle valli con conseguente debole esposizione al sole. Quest'ultima è maggiore durante la stagione secca, 8,5 ore al giorno, mentre nella stagione delle piogge diventa di 2,2 ore al giorno. L'esposizione totale all'anno è di 1864 ore, mentre, l'esposizione media mensile per gli ultimi cinque anni è 153,3 ore.

2.2 IL CONTESTO SOCIALE³

L'economia del villaggio è basata principalmente sull'agricoltura tradizionale praticata su piccoli appezzamenti di terreno, utilizzando metodi arcaici e rudimentali, e l'allevamento in recinti improvvisati. Nel villaggio di Bankondji non ci sono unità industriali e commercianti, sono poche le bancarelle gestite solo per alcune ore dagli abitanti del villaggio che le aprono quando non sono nei campi. È organizzato un mercato periodico ogni 8 giorni e in queste bancarelle si possono trovare alcuni prodotti di consumo quotidiano e beni di prima necessità.



Figura 2.3 – Agricoltura – Fonte: Arcs - Camerun



Figura 2.4 – Allevamento- Fonte: Arcs - Camerun

La più alta concentrazione della popolazione del villaggio di Bankodji si trova nel quartiere Ndomu. Durante la guerra civile degli anni 60, il quartiere Ndomu era un campo dove l'amministrazione coloniale aveva riunito la popolazione della regione per controllarla e proteggerla meglio. Da quel momento, questo quartiere è rimasto la piazza centrale del paese.

³ ARCS – Le système d'adduction d'eau potable de Bankondji



Nel 2013 è stato svolto un sondaggio demografico, per definire la suddivisione della popolazione di Bankondji, considerando che riunisce diversi distretti:

UNITÀ	BAMBINI	UOMINI	DONNE	TOT	FORESTIERI	TOT MAX	FAMIGLIE
MVEN	59	52	32	143	52	195	41
LU'	74	57	23	154	215	369	41
CHONO	65	45	35	145	289	434	46
BLOCCO1	106	84	40	230	328	558	52
BLOCCO2	73	91	57	221	374	595	67
BLOCCO3	75	66	70	211	309	520	43
BLOCCO4	60	69	44	173	297	470	51
BLOCCO5	23	29	26	78	114	192	17
SOMMA TOTALE	535	493	327	1355	1978	3333	358

Tabella 2.1 – Sondaggio demografico svolto nel 2013

Per i bambini si intendono tutti gli abitanti che hanno meno di 10 anni.

Dall'analisi demografica risulta che la popolazione è di 3333 abitanti, ma per ridurre al minimo gli inevitabili errori si può considerare che nel 2013 la popolazione di Bankondji era di 3500 abitanti. Ritenendo un tasso di crescita della popolazione del 15% ogni 10 anni, possiamo dire che nel 2028 la popolazione sarà di 4025 residenti.

Secondo l'OMS, nell'Africa rurale e quindi Bankondji, la quantità di acqua necessaria a persona per sopravvivere, per l'igiene personale, la cucina e le stoviglie, è di 20 litri/giorno. Tenendo in considerazione l'analisi demografica svolta nel 2013 e la previsione del 2028, è possibile analizzare il consumo d'acqua:

ANNO	POPOLAZIONE	ACQUA GIORNALIERA [m3]
2013	3500	70
2028	4025	80,5

Tabella 2.2 – Analisi del consumo di acqua potabile



2.3 GLI ASPETTI ANALIZZATI

Per ridurre la problematica idrica in Camerun e garantire l'approvvigionamento idrico, sono stati stanziati aiuti internazionali. In questo elaborato, in particolare, si analizzano le problematiche del villaggio di Bankondji, descritto nei sottocapitoli 2.1 e 2.2.

Dal 1980 al 1991, per merito della Danimarca, in Camerun sono state installate 335 stazioni (**Scanwater**) per la produzione e distribuzione di acqua potabile. Dopo questo periodo, la maggior parte delle stazioni sono state abbandonate dalle popolazioni. Nel 2012 è stato avviato un progetto predisposto da ARCS in partenariato con l'associazione locale Codebank 2000 per riabilitare la stazione **Scanwater** di Bankondji e ampliarla. A causa delle difficoltà finanziarie del comitato che fatica a pagare i manutentori, è svolto il minimo indispensabile per mantenere il sistema alimentato.

Uno degli obiettivi della tesi è proporre degli interventi di risanamento riguardanti il sistema di approvvigionamento idrico. Inoltre, il sistema di alimentazione delle pompe e del sistema di trattamento delle acque, è composto da pannelli fotovoltaici e un piccolo impianto idroelettrico. Questo ultimo a causa dell'inadeguatezza della turbina e della condotta forzata, è in disuso. In questo elaborato sono proposte diverse soluzioni a questi problemi, analizzandone anche il peso economico.

3. IL SISTEMA DI APPROVVIGIONAMENTO DI ACQUA POTABILE

3.1 LA COOPERAZIONE TRA DANIMARCA E CAMERUN⁴

La Danimarca ha finanziato, tra il 1980 e il 1991, l'installazione nelle zone rurali di 335 stazioni di approvvigionamento di acqua potabile.



Figura 3.1 - Njore Scan Water

Queste strutture, note come “**ScanWater station**” sono state prodotte dalla ONG norvegese **Scandinavia Water**. Le popolazioni principali beneficiarie, avevano la responsabilità delle spese di mantenimento, infatti, fino al 1990, le stazioni **ScanWater** sono state oggetto di un aiuto finanziario dal governo camerunense con il sostegno della cooperazione danese. La stazione **ScanWater** a Bankondji è stata tra le ultime costruite nel 1986 ed è stata originariamente progettata per funzionare in questo modo:

- Un pozzo profondo circa 60 metri scavato in una secca, doveva servire da punto fornitura d'acqua;
- Una pompa immersa in questo pozzo, doveva consentire l'estrazione di quest'acqua e inviarla, attraverso 1800 metri di tubazione, ad un serbatoio con una capacità di circa 20 m³, posto ad un dislivello di 200 metri dal pozzo;

⁴ ARCS – Le système d'adduction d'eau potable de Bankondji



- L'impianto doveva funzionare utilizzando un gruppo elettrogeno diesel, posto in un locale tecnico sotto il serbatoio;
- L'acqua potabile doveva essere assicurata mediante ossidazione, filtrazione e clorazione;

Secondo le informazioni raccolte dagli abitanti del villaggio e soprattutto dal capo del villaggio, questa installazione non ha quasi mai funzionato. Secondo alcuni indagini, la pompa sommersa posizionata nel pozzo non aveva caratteristiche tecniche compatibili con la prevalenza del sito. Inoltre, non c'è mai stata la consegna dell'acquedotto finito al capo villaggio o i responsabili amministrativi locali. Questa struttura è stata successivamente vandalizzata e i ladri ne hanno preso la maggior parte dell'attrezzatura.

PRINCIPALI MOTIVAZIONI DEL FALLIMENTO

Le stazioni **ScanWater** hanno subito un fallimento palese in Camerun, soprattutto a Bankondji, a causa di diversi fattori:

- L'impianto doveva funzionare utilizzando il diesel, che è molto costoso, pertanto le spese per le bollette di diesel per alimentare il gruppo elettrogeno non potevano essere pagate regolarmente dagli abitanti per mancanza di mezzi finanziari;
- Mancanza totale della manutenzione da parte dei beneficiari. Quest'ultimi non sono stati addestrati per le opere di manutenzioni da svolgersi dopo la messa in funzione dell'acquedotto.
- Vandalizzazione dell'opera da parte dei ladri, in particolare il furto del gruppo elettrogeno destinato ad alimentare la pompa sommersa;
- Secondo L'ONG norvegese **Scandinavia Water**, Bankondji aveva una popolazione nel 1986 di circa 3200 abitanti. Secondo le previsioni di questa stessa ONG, nel 2005 Bankondji avrebbe dovuto avere 4600 abitanti, vale a dire una crescita di circa il 30% in 20 anni. Sfortunatamente per fare questa proiezione, L'ONG si è basata sulla crescita media della popolazione Camerunense, non considerando il fenomeno dell'esodo di massa dei giovani che lasciano il villaggio per stabilirsi nelle città;
- Dopo un attento studio effettuato geofisico e idrologico, il pozzo non è stato trovato in un luogo che soddisfi le condizioni igieniche minime e non è stato possibile escludere infiltrazioni nel pozzo di acqua dal vicino ristagno.



3.2 LA COLLABORAZIONE TRA ARCS E L'ASSOCIAZIONE CAMERUNENSE CODEBANK 2000

ARCS⁵

ARCS Arci Culture Solidali APS è un'associazione di promozione sociale ai sensi dell'articolo 35 del D.Lgs. del 3 luglio 2017. Fondata a Roma nel 1985 da ARCI, tra le maggiori associazioni italiane del terzo Settore e diffusa su tutto il territorio nazionale, ARCS è una Onlus ed è iscritta all'elenco delle Organizzazioni della Società Civile dell'Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo (AICS) con decreto 2016/337/000132/3, in qualità di soggetto di cui all'art. 26 della L. 125/2014.

ARCS si occupa di solidarietà e cooperazione internazionale, volontariato ed educazione alla cittadinanza globale, aiuto umanitario e accoglienza.

La Onlus promuove processi di cambiamento sociale che garantiscono a ogni persona, in particolare a quelle che appartengono a fasce vulnerabili della popolazione, piena inclusione sociale e percorsi di cittadinanza attiva, completo godimento dei diritti civili, uguaglianza di genere, accesso all'istruzione, alla formazione professionale e al mondo del lavoro.

ARCS agisce per realizzare un mondo di diritti globali, di pace e di democrazia, giusto e sostenibile. Su questa visione è stata basata la costruzione e il consolidamento di relazioni e partenariati internazionali, in sintonia con gli obiettivi prioritari dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

I valori principali alla base dell'Associazione sono:

- **Solidarietà:** realizzazione di un mondo di diritti globali, di pace e di democrazia, giusto e sostenibile per realizzare un'idea di solidarietà e giustizia sociale che parta dai bisogni concreti dei popoli;
- **Onestà:** ogni persona in ARCS si impegna, nell'espletamento del proprio incarico, a non ricercare l'utile personale e a perseguire costantemente integrità e rettitudine nelle proprie azioni e scelte;
- **Uguaglianza:** lotta contro ogni forma di discriminazione, valorizza le differenze e garantisce in ogni suo operato pari opportunità e uniformità di trattamento prescindendo

⁵ ARCS – 2019 Bilancio sociale



da differenze di età, sesso, razza, handicap fisici, religione, secondo il principio di non discriminazione;

- **Responsabilità:** ARCS ha adottato un codice etico che dichiara principi e valori che devono ispirare, guidare e regolamentare comportamenti, condotta e responsabilità di tutto il personale e ciascun soggetto che operi per conto dell'organizzazione;
- **Trasparenza:** ARCS dal 2011 è soggetta alle procedure di Certificazione dell'IID (Istituto Italiano della Donazione) relative al corretto utilizzo dei fondi raccolti e delle risorse impiegate nelle attività a garanzia della trasparenza amministrativa e di rendicontazione nei confronti dei donatori pubblici e privati.

L'Organizzazione è impegnata da anni in Camerun nel migliorare le condizioni socio-sanitarie attraverso l'incremento dell'accesso diretto dell'acqua potabile e il potenziamento dell'uso di energie rinnovabili. In Camerun il 24% circa della popolazione non ha accesso a una fonte di acqua potabile sicura. Nelle zone rurali occidentali si registrano condizioni particolarmente complesse: l'acqua scarseggia e a causa di contaminazioni diventa il principale veicolo di malattie infettive con pesanti ripercussioni in particolare sul tasso di mortalità infantile. Nelle zone rurali del Camerun la diffusione di patologie come la dissenteria e la febbre tifoide è legata nel 50% dei casi al consumo di acqua non potabile. L'impossibilità di accedere a un sistema di approvvigionamento tramite fonti sicure non dipende esclusivamente dalla scarsità fisiche di risorse idriche o dall'assenza di risorse economiche necessarie agli investimenti ma è causata anche da altri fattori socio-politici: errati modelli di gestione, esistenza di disuguaglianze, impossibilità di intervento su elementi strategici come la definizione delle tariffe e dei piani di investimento.

CODEBANK 2000

Codebank 2000 è una organizzazione a non scopo di lucro che è stata fondata nel 2000. Essa rappresenta un raggruppamento di diverse personalità originarie della località di Bankondji che vivono in altre città del paese (Yaounde, Douala, Ebolowa, ...) ed all'estero. Si tratta di politici, imprenditori, funzionari statali, pensionati, docenti di scuole superiori ed università ed altre figure professionali. Lo scopo del Codebank 2000 è promuovere tutte le iniziative che hanno come scopo lo sviluppo della località di Bankondji.

IL RAFFORZAMENTO DELLE CAPACITÀ DI AUTOGESTIONE E DEI PROCESSI DI SVILUPPO A LIVELLO LOCALE⁶

In Camerun nel villaggio di Bankondji, nel cuore verdeggiante regione dell'ovest, ARCS, in partenariato con l'associazione locale Codebank 2000 (Comité de developpement de Bankondji 2000), ha avviato un progetto finanziato nel 2012 dalla Delegazione dell'Unione Europea a Yaoundè. L'obiettivo principale del progetto è stato riabilitare la stazione **Scanwater** di Bankondji, evitando il motivo principale per cui le stazioni **Scanwater** hanno sperimentato un fallimento evidente in Camerun, ovvero la difficoltà degli abitanti del villaggio a mantenere queste strutture. È stata utilizzata l'energia fotovoltaica come fonte di energia per l'alimentazione di pompe sommergibili e pompe dosatrici di cloro del sistema di acqua potabile. Oltre alla realizzazione delle opere necessarie al recupero del sistema idrico costruito negli anni '80 a Bankondji, è stato possibile lavorare con la comunità locale per stimolare, attraverso la partecipazione e il coinvolgimento continuo, un processo di rafforzamento e presa di coscienza delle proprie capacità e responsabilità. Le ultime attività realizzate erano focalizzate soprattutto sul rafforzamento della sostenibilità del modello di gestione dell'impianto idrico con gli attori competenti e alla gestione della convenzione quinquennale fra il C.E.Po. Bank e il GIE-UDS dell'università di Dschang per il monitoraggio costante della qualità dell'acqua erogata a Bankodji. Tutti i lavori di realizzazione nel sistema idrico di Bankodji sono stati eseguiti in regia diretta da ARCS sotto la supervisione diretta di un esperto internazionale che ha coordinato i lavori. Nella realizzazione dell'intero sistema idrico di adduzione, potabilizzazione e distribuzione di acqua potabile, si è voluto coinvolgere quanto più possibile la popolazione residente del villaggio che ha collaborato nel progetto in vari modi.



Figura 3.2 – Inaugurazione rete idrica di Bankondji

⁶ Calogero Messina – Acqua potabile di Bankondji: un sogno diventato realtà

3.3 LA RETE IDRICA DI BANKONDJI

La rete idrica di Bankondji garantisce almeno 60 m³ d'acqua captati, potabilizzati e distribuiti giornalmente. La qualità dell'acqua distribuita, è certificata dal laboratorio di analisi dell'università di Dschang come conforme alla regolamentazione camerunense rispetto a tutti i parametri microbiologici e fisico-chimici. La rete consta di:

- Un pozzo trivellato a 60m di profondità ed equipaggiato con pompe solari immerse;
- Una Sorgente riabilitata (Bacino Génie Rural);
- Un sistema di alimentazione delle pompe e del sistema di trattamento delle acque ibrido, che unisce l'energia fotovoltaica e quella idroelettrica;
- Una rete idrica di 14 km che distribuisce l'acqua potabile;
- 36 fontane pubbliche installate ad una distanza non superiore a 300 metri da ogni residente del villaggio;
- Fontane di acqua potabile per le 5 scuole e l'ospedale di Bankondji.

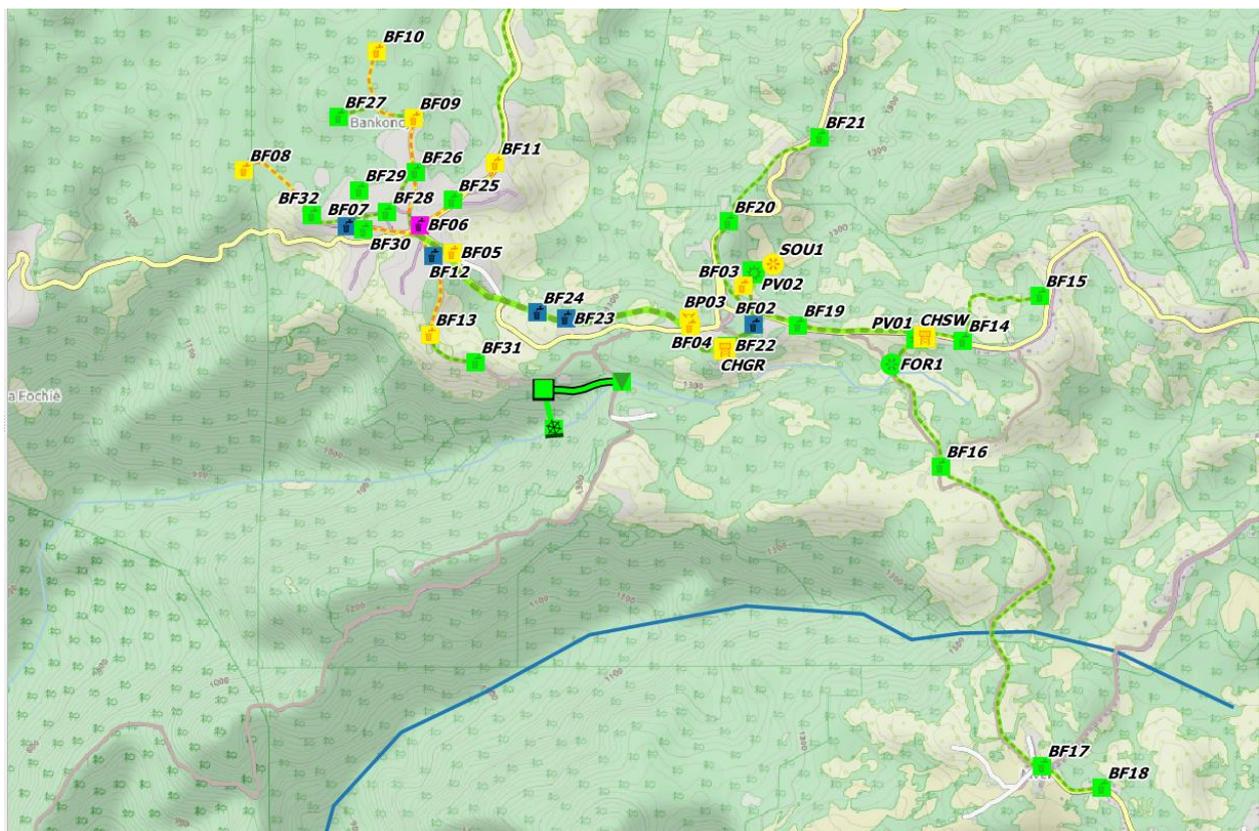


Figura 3.2 – Progetto rete idrica –Fonte: Qgis



Vasca di carico
Captazione
Turbina idroelettrica



Fontana
Connessione particolare
Campo fotovoltaico
Serbatoio
Perforazione/Sorgente
Valvola

LE FONTI D'ACQUA⁷

La prima possibilità considerata è stata la riabilitazione del pozzo esistente, ma un attento studio geofisico e idrologico, ha portato ad escludere questa ipotesi perché è un'operazione estremamente costosa. Inoltre, questo pozzo non è stato trovato in un luogo che soddisfi le condizioni igieniche minime, perché non è possibile escludere infiltrazioni nel pozzo di acqua dal vicino ristagno.

A seguito di uno studio geofisico effettuato a partire dal serbatoio di acqua **Scanwater** a Bankondji, è stato individuato il luogo ottimale per la costruzione di un nuovo pozzo: località Nshimani ad una distanza di circa 250 m e un dislivello di 54 m. I campioni prelevati durante le operazioni di perforazione hanno permesso di ricostruire la stratigrafia del sito.

PROFONDITÀ	DESCRIZIONE
0 - 2 m	Suolo lateritico non consolidato
2 - 9 m	Ammasso roccioso molto duro e principalmente basaltico
9 - 25 m	Passaggio argilloso, sabbia, alteriti
25-40 m	Basalto gravemente fratturato, alterato e fessurato (falda acquifera principale)
40-63 m	Vecchia base in granito

Tabella 3.1 - Stratigrafia sito

⁷ ARCS – Le système d'adduction d'eau potable de Bankondji



Poiché il diametro della testa di perforazione è 140 mm, è stato installato un tubo in PVC con un diametro intorno a 110mm. I filtri sono stati installati tra 38 e 44 m e tra 50 e 56 m circa.

Il pozzo è stato sottoposto a due prove di pompaggio, la prima Slug test (tipo particolare di test acquifero in cui l'acqua viene aggiunta o rimossa rapidamente da un pozzo sotterraneo e il cambiamento della testa idraulica viene monitorata nel tempo) e la seconda pompaggio a stadi con flusso crescente.

La capacità produttiva del pozzo è stata stimata tra 2,5 e 3 m³/h di acqua per un periodo inferiore a 6 ore consecutive.

È stata realizzata una testa di perforazione in acciaio e cemento armato per proteggere la perforazione dalle infiltrazioni di acqua di superficie e per mettere in sicurezza l'installazione.

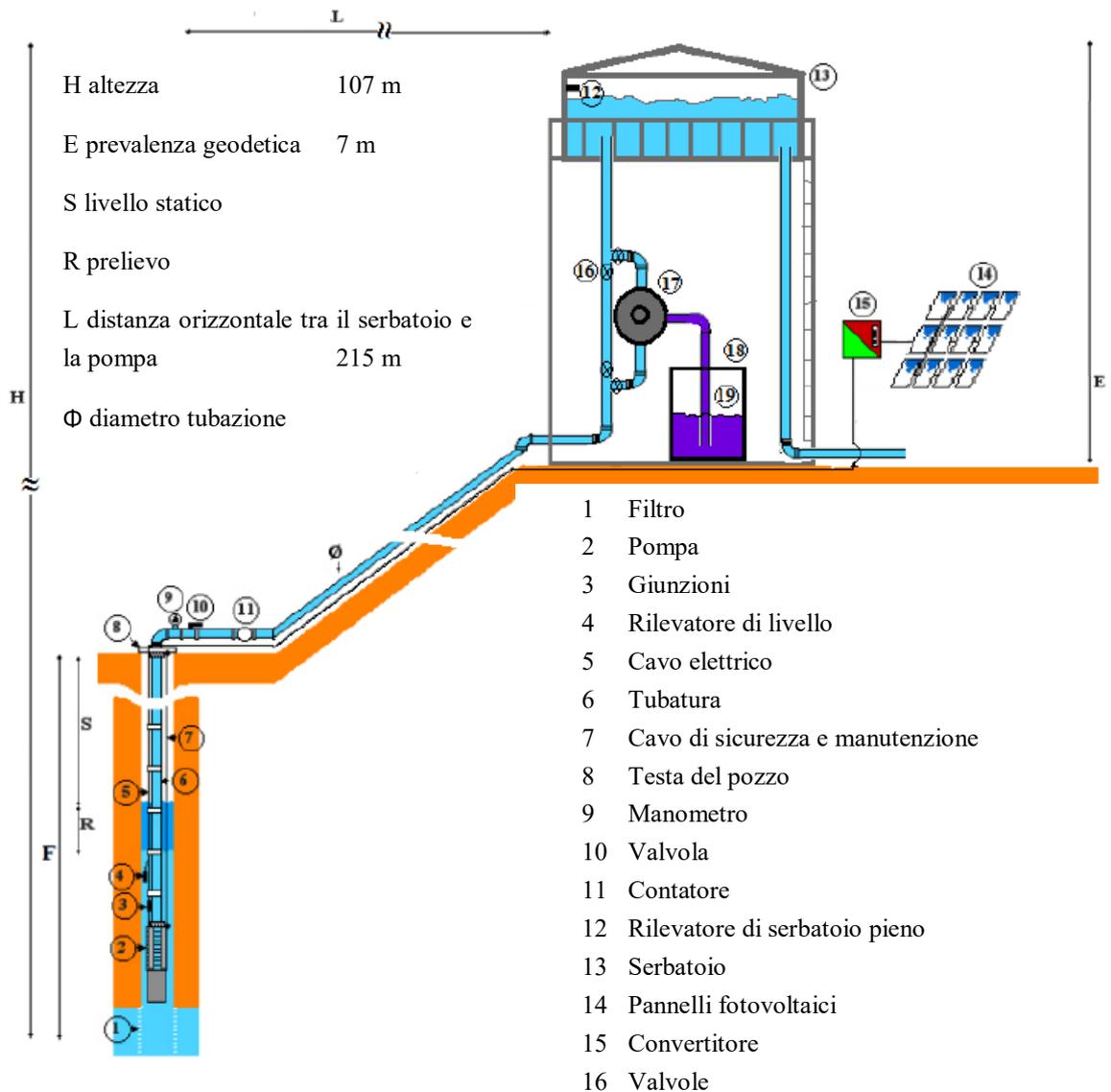


Figura 3.3 - Funzionamento pozzo trivellato- Fonte: ARCS – Annexe 2 SOURCES D'ENERGIE

Negli anni '80, l'ingegneria rurale ha avviato i lavori per portare l'acqua potabile al villaggio Bankondji, ma il progetto è stato abbandonato all'arrivo dell'ONG norvegese Scandinavian Water e mai completato. I lavori eseguiti sono:

- Una vasca di 20 m³, situata in una pianura molto ricca di acqua, a ridosso del paesino. La vasca è costruita in cemento armato e coperta da un solaio. Il fondo è in terra battuta che permette la filtrazione dell'acqua che lo riempie;
- Un serbatoio sopraelevato di 40 m³, posta circa a 600m a monte del bacino idrografico, in corrispondenza di un dislivello di 50 m.

Gli interventi di risanamento, condotti da ARCS, sono:

- Installazione di un tubo di scarico;
- Protezione del tombino che permette l'ingresso in vasca con bordo rialzato e copertura in cemento armato;
- Pulizia del fondo della vasca e stesura di uno strato di ghiaia pulita;
- Definizione delle zone di protezione del bacino idrografico;

LE FONTI ENERGETICHE E POMPE⁸

La pompa sommersa del pozzo trivellato Nshimani è alimentata da un impianto fotovoltaico installata accanto al serbatoio, formato da 40 moduli in silicio policristallino Hyundai HiS-M203SF collegato direttamente al controller della pompa PS4000 (figura 3.2).



Figura 3.4 – Moduli fotovoltaici



Figura 3.5 – Pompa solare immersa Berntz Lorentz PS 4000

⁸ ARCS – Le système d'adduction d'eau potable de Bankondji
:ARCS – Annexe 2 SOURCES D'ENERGIE



Figura 3.6 – Foto del fotovoltaico

La pompa sommersa della sorgente è una pompa trifase Vicounte 4SD6 / 20 ed è alimentata da un impianto fotovoltaico ricavato da 44 moduli in silicio policristallino Hyundai HiS-M203SF (figura 3.3)

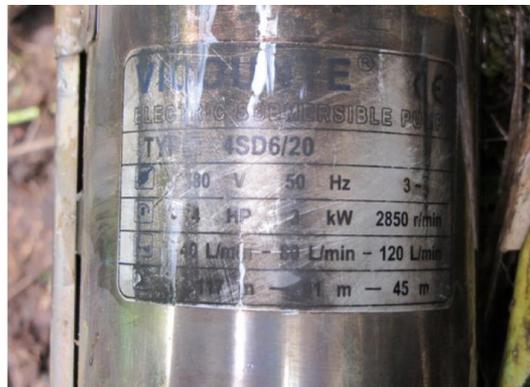


Figura 3.7 – Pompa solare immersa Vicounte

Inoltre, è presente un impianto fotovoltaico autonomo che alimenta tutti i servizi ausiliari (impianto acqua potabile, illuminazione notturna del campo fotovoltaico, illuminazione locale tecnico).

L'impianto fotovoltaico è stato progettato sulla base di dati mensili di radiazione media, quindi durante la stagione delle piogge nella quale il cielo rimane completamente coperto rischia di non essere in grado di fornire energia necessaria per la pompa. L'installazione di batterie è stata esclusa per motivi ambientali e di durata, quindi la migliore risorsa energetica alternativa disponibile è l'idroelettrico (Capitolo 4).



IL SISTEMA DI POTABILIZZAZIONE⁹

L'acqua del pozzo ha mostrato, fin dalle prime analisi, un eccesso di ferro, manganese e pH basso. È un'acqua che necessita di un trattamento di depurazione ma non include problemi di salute, inoltre questo tipo di acqua è favorevole alla disinfezione con derivati del cloro. Il ferro è un elemento essenziale per l'uomo e si stima che la dose giornaliera minima sia di 10-15 mg, tuttavia le concentrazioni alte possono creare un accumulo nel corpo, motivo per cui le pubblicazioni dell'OMS stabiliscono un valore raccomandato di 0,3 mg/l come compromesso tra effetti sulla salute e caratteristiche organolettiche dell'acqua. Il sistema di ossidazione e i filtri dello Scanwater erano fermi in perfette condizioni, quindi sono stati riqualificati ed è stato installato un nuovo compressore oil-free ed un sistema di misurazione dell'aria.

L'iniezione di ipoclorito di sodio nel serbatoio, è eseguita da una pompa dosatrice elettronica, collegata ad un contatore d'acqua ad impulsi per il dosaggio. La soluzione di ipoclorito di sodio viene prodotta in loco mediante elettrolisi del sale da cucina utilizzando un dispositivo OSEC (On Site Electro Chlorination) completamente automatizzato.

L'acqua della seconda fonte di approvvigionamento, è stata sottoposta ad analisi chimica in Italia. I parametri misurati sono differenti da quelli registrati per l'acqua del pozzo: pH basso, nessuna durezza e tracce minime di metalli. Quest'acqua non presenta problemi di tipo chimico, pur essendo molto povera di minerali, ma necessita di disinfezione essendo potenzialmente carica a livello microbiologico. La soluzione di ipoclorito di sodio necessaria è prelevata due volte a settimana dalla stazione Scanwater. Non avendo alcun collegamento al sistema elettrico ausiliario, è stata installata una pompa dosatrice idromeccanica che consente un dosaggio compreso tra lo 0,03 % e 0,125%. A monte della pompa dosatrice è installato un filtro in fibra sintetica per proteggerla da usura precoce ed un manometro permette il monitoraggio dell'intasamento di questo filtro.

La stazione di trattamento dell'acqua è stata costruita per rimuovere ferro e parzialmente manganese, nonché solidi in sospensione dal pozzo. In particolare sono presenti due filtri, nel primo si ha ossidazione e filtrazione grossolana, invece il secondo filtro ha una frazione più fine di massa filtrante per trattenere gli ossidi di ferro creati nella prima parte.

⁹ ARCS – Le système d'adduction d'eau potable de Bankondji
ARCS – Annexe 3 TRAITEMENT DES EAUX

Il processo prevede: ossidazione mediante aria, volume di contatto, filtrazione grossolana, filtrazione fine, disinfezione, stoccaggio in vasca e distribuzione. Un processo di questo tipo è ideale per scomporre il ferro e, in parte, manganese.

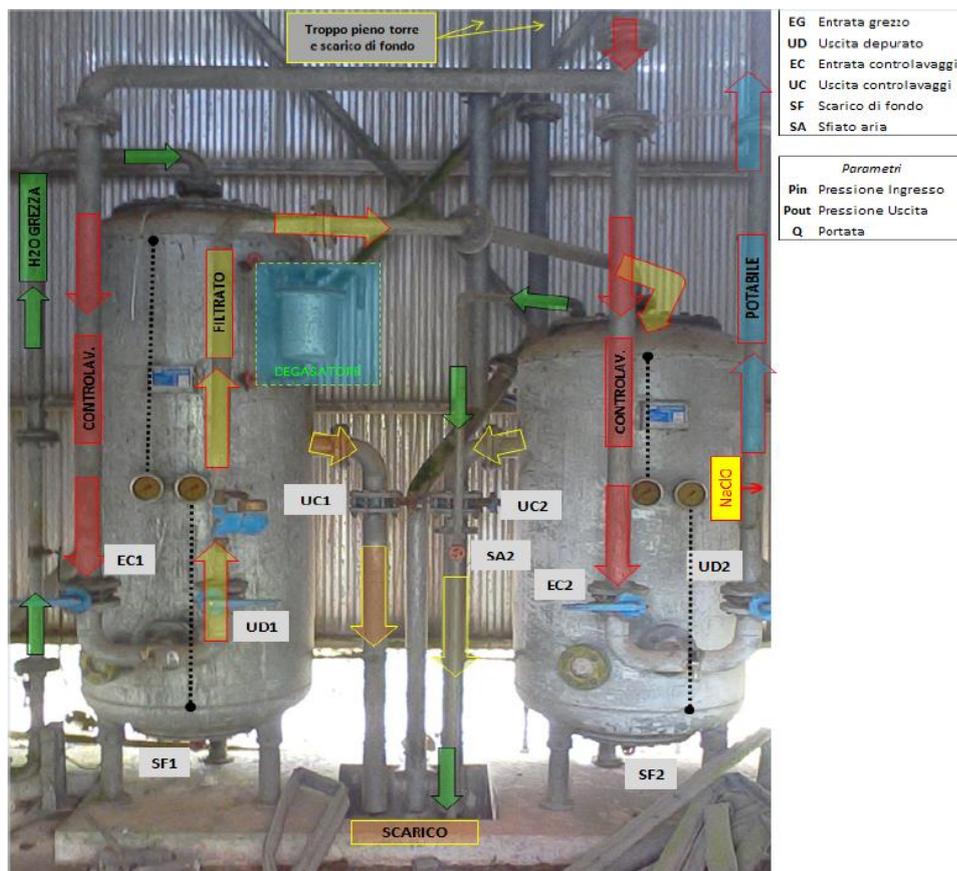


Figura 3.8 – Schema idraulico dei filtri

LA RETE DI DISTRIBUZIONE¹⁰

La rete di distribuzione realizzata dall'ONG norvegese, lunga circa 8 km, è stata ripristinata per un tratto ancora in buono stato (4 km). Le linee da sostituire e gli ampliamenti (10 km), sono stati realizzati con tubi in PVC autosigillanti.

Delle 13 colonnine esistenti, 11 sono state riabilite e ne sono state costruite altre 20. Tutte le colonnine sono dotate di misuratori di pressione temporizzati e rubinetti.

La rete idrica realizzata tra 1980 e il 1991, è stata spostata perché si trovava sulla strada principale del paese, soggetta a frequenti lavori di ristrutturazione dopo ogni stagione delle piogge. Il nuovo

¹⁰ ARCS – Le système d'adduction d'eau potable de Bankondji
ARCS – Annexe 5 - RESEAU

percorso attraversa strade secondarie ed è distanziato almeno 3 metri dal bordo della strada. I tubi sono interrati ad una profondità di 80 cm, è presente una rete metallica di avvertimento blu posizionata a 40 cm ed il percorso è materializzato in superficie da marcatori in cemento. Sono stati ripristinati due riduttori di pressione esistenti ed è stato costruito uno nuovo.



Figura 3.9 – Andamento delle curve di livello della zona – Fonte: Google Maps

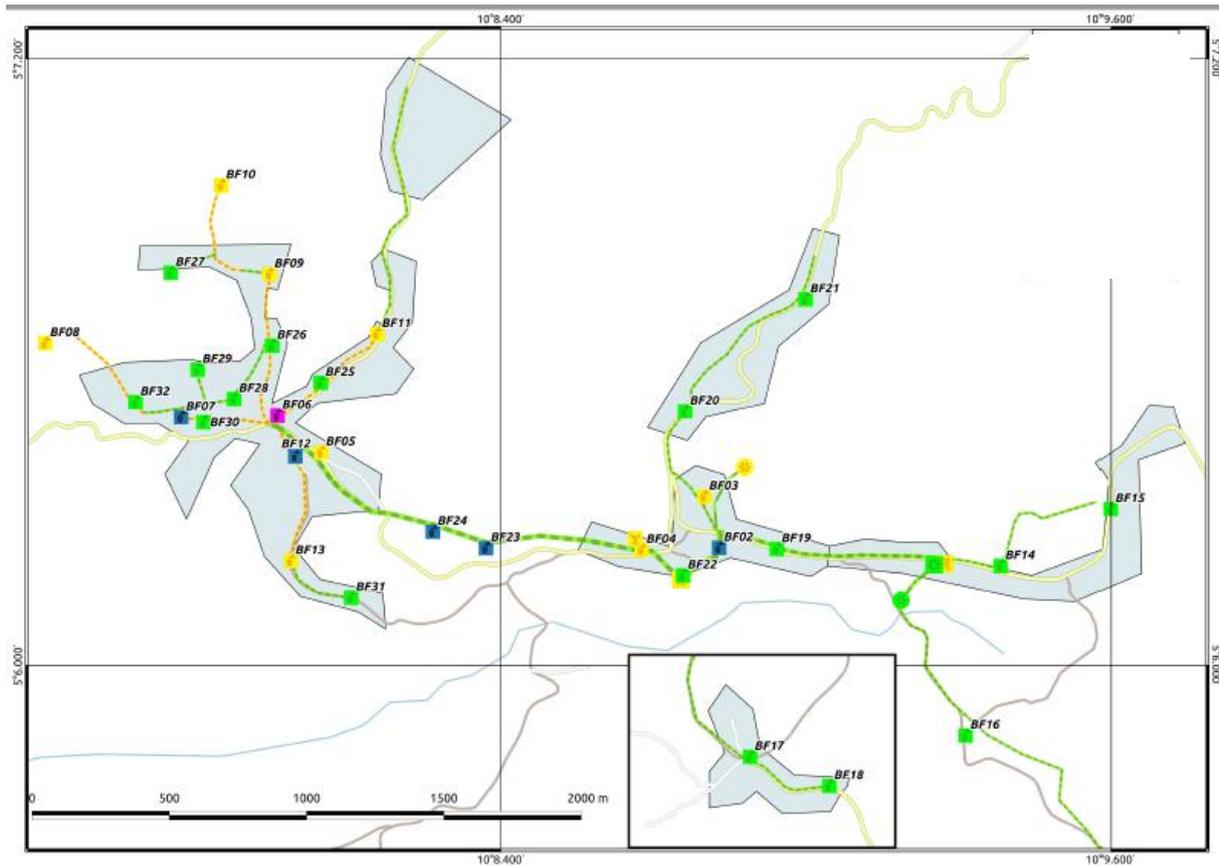


Figura 3.10 – Rete di distribuzione

-  Fontana esistente
-  Fontana nuova
-  Fontana privata
-  Scuola
-  Serbatoio
-  Serbatoio nuovo
-  Tubazioni
-  Tubazioni nuove



3.4 POSSIBILI INTERVENTI DI RISANAMENTO

Per il funzionamento del sistema di approvvigionamento a Bankondji, sono necessarie alcune modifiche e migliorie da apportare. Gli interventi necessari sono localizzati nel locale tecnico ScanWater e nel locale tecnico del Génie Rural. Nel primo caso le operazioni da effettuare sono:

- Sostituzione della pompa dosatrice elettronica nel locale tecnico Scan Water; quella attualmente in funzione risulta fuori uso;
- Sostituzione del filtro che consente di trattenere le particelle solide presenti nell'acqua estratta dal pozzo;
- Posa in opera di un compressore ad aria nel locale tecnico Scan Water;
- Realizzazione di una linea elettrica quasi totalmente interrata tra il locale tecnico vicino allo ScanWater ed il pozzo dove viene estratta l'acqua;

In corrispondenza del locale tecnico del Genie Rural:

- Sostituzione della pompa dosatrice meccanica con una pompa elettronica o sostituzione della parte usurabili della pompa meccanica Dosotron (nel caso di sostituzione con una pompa elettronica, dovrebbe essere realizzato un mini impianto fotovoltaico per l'alimentazione);



4. IL MICRO IDROELETTRICO

Un sistema di alimentazione delle pompe e del sistema di trattamento delle acque ibrido fotovoltaico e idroelettrico presenta diversi vantaggi:

- I due sistemi sono complementari dal punto di vista della stagione;
- Aumenta la quantità di acqua che può essere prodotta dal pozzo, operando 24 ore su 24;
- Consente di ridurre le dimensioni dell'impianto fotovoltaico, che verrà dimensionato sulla base delle ore di sole;
- La tecnologia idroelettrica è molto semplice e permette una completa manutenzione da parte di tecnici locali a bassissimo costo;
- L'energia in eccesso potrebbe essere resa disponibile per altri usi.

Lo scopo di un impianto idroelettrico è di convertire l'energia potenziale di una massa d'acqua, che defluisce naturalmente con una certa differenza di quota (denominata "salto" o "caduta"), in energia elettrica nel punto più basso dell'impianto, dove è collocata la centrale.

A seconda del salto disponibile, gli impianti possono essere classificati come segue:

- alto salto: al di sopra di 100 m;
- medio salto: 30-100 m;
- basso salto: 2-30 m.

Questi intervalli non sono rigidi e servono solo allo scopo di classificare i siti idroelettrici.

Per definire la fattibilità dell'impianto è stato necessario incominciare dalla stima dell'entità delle risorse idriche disponibili sul posto: le precipitazioni e il corso d'acqua. Le piogge di Bankondji sono largamente influenzate dalla sua altitudine ed è possibile individuare due stagioni: una lunga stagione delle piogge da metà marzo a metà novembre e una stagione secca da metà novembre e metà marzo. La stagione secca non significa assenza di pioggia, ma un periodo in cui piove meno. Durante il periodo dal 1980 al 1992 le precipitazioni annuali hanno oscillato tra 1500 e 2000 millimetri o in media 1590 mm e 160 giorni di pioggia all'anno. Sul versante destro della valle è ubicato un piccolo corso d'acqua con una portata massima di piena superiore a 100 l/s ed una portata di magra di 10 l/s. Il dislivello disponibile in questa valle è molto importante (circa 700 m) ma questo impianto è limitato ad un dislivello di 101 m.

La microcentrale elettrica di Bankondji progettata da ARCS in partenariato con l'associazione locale Codebank 2000, avrebbe dovuto funzionare alla sua portata nominale di 30 l/s, producendo

20 kW O 480 kWh al giorno. In condizioni di minimo flusso, con una portata di 10l/s producendo 6,6 kW, ovvero 160 kWh al giorno.

4.1 L' IMPIANTO IDROELETTRICO ¹¹

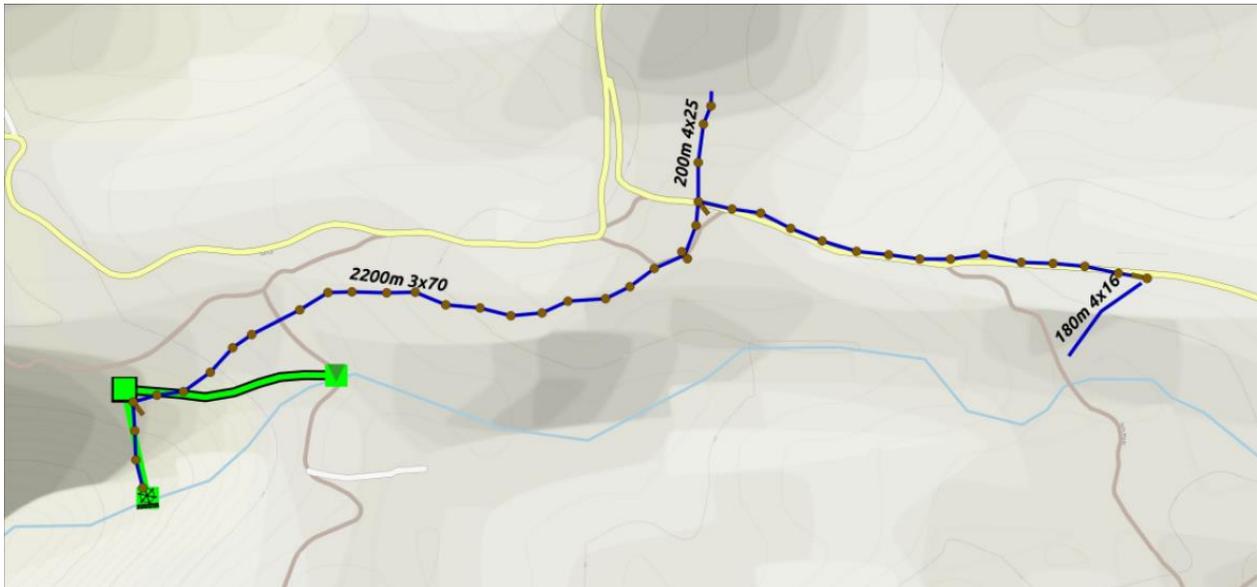
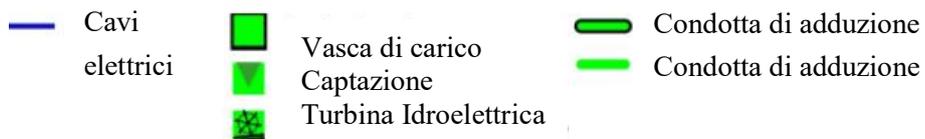


Figura 4.1 – Impianto Idroelettrico in Qgis



¹¹ ARCS – Micro-centrale hydroélectrique pour l'auto-production de l'énergie électrique

LA CAPTAZIONE

L'opera di presa è realizzata all'uscita di un canale sotterraneo stradale esistente. È formato da una maglia trapezoidale con leggera pendenza, fissata su una vasca in cemento dalla quale una condotta di convogliamento lunga 15 m conduce le acque al bacino di sedimentazione.

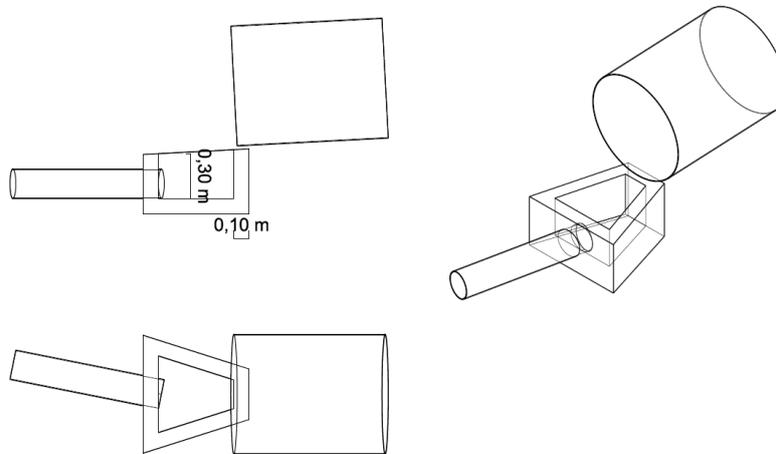


Figura 4.2 – Disegni tecnici dell'opera di presa



Figura 4.3 – Opera di presa

LA VASCA DI SEDIMENTAZIONE

La vasca di sedimentazione è costituita da una camera d'ingresso, una valvola di regolazione, una rete metallica, una camera di sedimentazione lunga 4 m e larga 90 cm, uno stramazzo a cresta spessa e una camera di uscita. Il bordo della camera d'ingresso è 10 cm più alto del livello dell'acqua, mentre il livello dell'acqua all'interno della vasca di sedimentazione è fissato da un troppo pieno a 30 cm dall'intradosso della vasca. Il fondo della camera di sedimentazione è inclinato verso un punto di scarico, formato da un gomito in PVC $\Phi 200$ e chiusa da una sezione asportabile di tubo in PVC $\Phi 200$. Una barriera di cemento impedisce al materiale galleggiante di raggiungere lo sfioratore. Il livello dello sbarramento è 7 cm al di sotto dell'intradosso. L'intera vasca è coperta da una lastra accessibile da tre tombini.

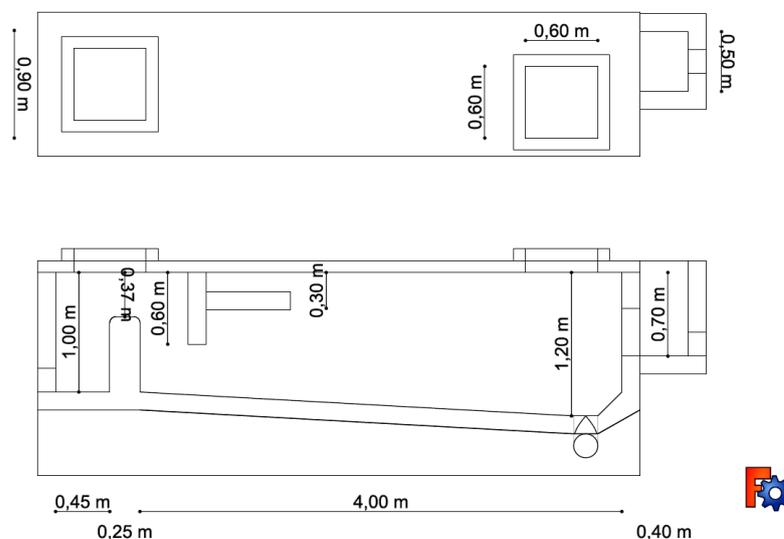


Figura 4.4 – Vista dall'alto e laterale della vasca di sedimentazione



Figura 4.5 – Foto dei primi due tombini della lastra che ricopre la vasca di sedimentazione

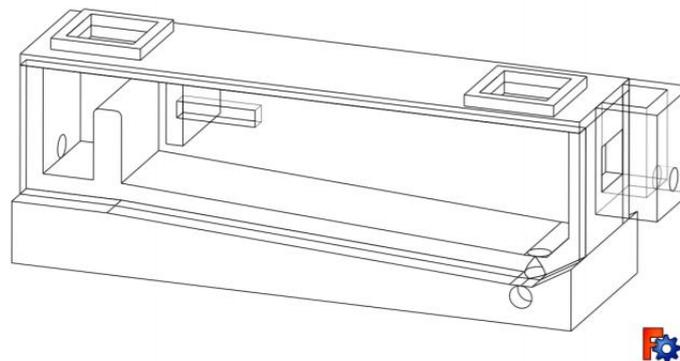


Figura 4.6 – Vasca di sedimentazione

LA CONDOTTA DI ADDUZIONE

La condotta di alimentazione in PVC $\Phi 200$ viene posata sul lato destro della valle, per una lunghezza di circa 350 m e una pendenza dello 0,6%. Ogni 50 m è presente un pozzo di ispezione ed una valvola d'intercettazione è installata all'estremità del tubo

LA VASCA DI CARICO

La vasca di carico ha un'altezza di 3,5 m, una larghezza di 72 cm ed una lunghezza di 2m. La condotta di adduzione entra in prossimità del fondo della vasca. Il fondo della vasca di carico è inclinato verso un punto di svuotamento formato da una curva in PVC $\Phi 200$ e chiuso da un tratto

estraibile di tubo in PVC $\Phi 200$. L'uscita del tubo di scarico è incanalata lontano dal percorso della condotta forzata. La vasca è coperta da una lastra con un tombino e l'accesso alla vasca è garantito da scale mobili e tiranti in acciaio fissati al muro.

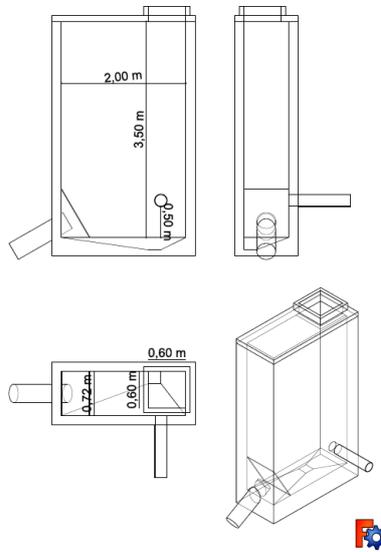


Figura 4.7 – Differenti viste della vasca di carico



Figura 4.8 – Foto della vasca di carico

LA CONDOTTA FORZATA

La condotta forzata in acciaio $\Phi 300$ ha una lunghezza di 250 m ed un dislivello di 98 m. La condotta è formata da tubi di 4 m uniti da giunti flangiati. Il tubo è sollevato da terra di 30 cm e fissato a blocchi di ancoraggio ogni 12 m.

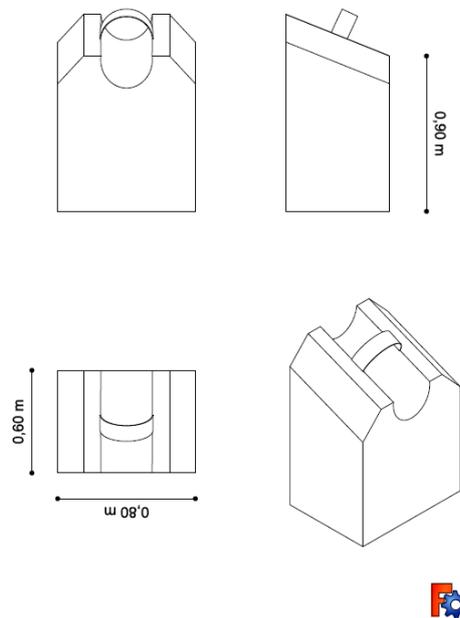


Figura 4.9 – Blocchi di ancoraggio

In corrispondenza del locale tecnico, la tubazione è dotata di un manometro e di un rubinetto di servizio.

IL LOCALE TECNICO

Il locale tecnico ospita la turbina, il generatore, lo stabilizzatore di tensione e la vasca di dissipazione. Il locale in muratura di blocchi di cemento ha una dimensione interna di 2,5x3,5 m ed un'altezza minima di 2,5 m con copertura ad un'unica falda in lamiera di alluminio. La turbina e il generatore sono installati su un telaio orizzontale fissato a terra. Nella parte bassa del locale è presente un canale che porta l'acqua dalla turbina al ruscello.

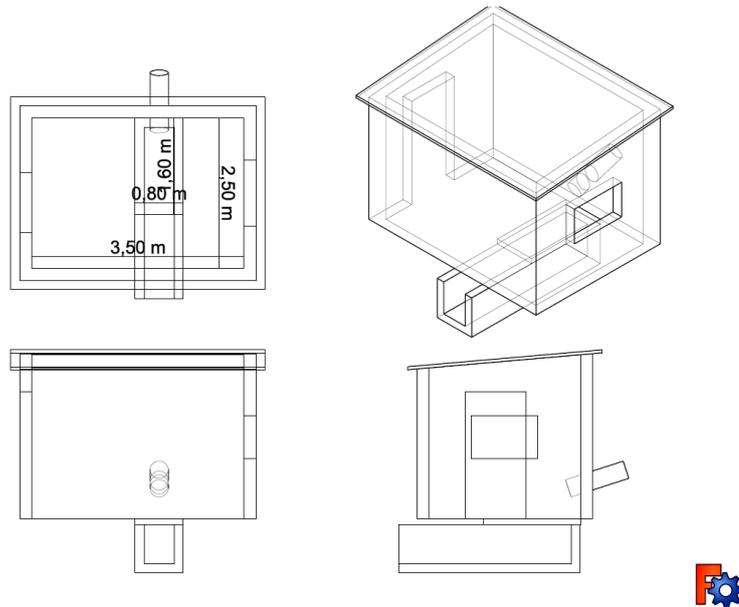


Figura 4.10 – Locale tecnico

4.2 LA TURBINA ESISTENTE

La turbina, installata nell'impianto idroelettrico in Camerun, è di tipo cross-flow con regolazione manuale della portata e collegata al generatore tramite una trasmissione a puleggia e cinghia.



Figura 4.11 – Turbina cross-flow



Il generatore ha il ruolo di trasformare in energia elettrica l'energia meccanica trasmessa dalla turbina. In origine si utilizzavano generatori a corrente continua (dinamo); attualmente, salvo rarissime eccezioni, s'installano generatori a corrente alternata trifase. In funzione della rete che deve alimentare, il progettista può scegliere:

- Alternatori sincroni, equipaggiati con un apparato di eccitazione a corrente continua o a magnete permanente (rotante o statico) associato ad un regolatore di tensione di modo che, prima di essere collegati alla rete, generano energia alla stessa tensione, frequenza ed angolo di fase e inoltre forniscono, una volta connessi, l'energia reattiva richiesta dal sistema. I generatori sincroni possono funzionare staccati dalla rete (in isola), in quanto il sistema di eccitazione è indipendente dalla rete. Normalmente, se la potenza è maggiore di 5000 kVA, s'impiegano senz'altro generatori sincroni.
- Alternatori asincroni, sono semplici motori a induzione con rotore a gabbia di scoiattolo, senza la possibilità di regolazione della tensione. Girano a una velocità direttamente rapportata alla frequenza della rete cui sono collegati. Dalla rete assorbono la corrente d'eccitazione e l'energia reattiva necessaria alla propria magnetizzazione. Quest'energia reattiva può essere compensata, se lo si ritiene conveniente, mediante banchi di condensatori. Non possono generare corrente quando sono scollegati dalla rete perché non sono in grado di provvedere alla propria corrente di eccitazione. Si impiegano sempre, se non è necessario che funzionino in isola, sotto i 500 kVA di potenza. Tra i 500 kVA e 5000 kVA la scelta è condizionata dalle caratteristiche della rete di distribuzione. Tuttavia, dal momento che sono più economici, trovano qualche piccola applicazione in piccole reti isolate nei casi in cui non è richiesta una fornitura di elettricità di qualità non troppo elevata.

Il generatore utilizzato nell'impianto, è un alternatore sincrono marca Vackson con una potenza nominale di 20 kW. Tutte le caratteristiche elettriche sono indicate sulla targa dati (figura 4.20).

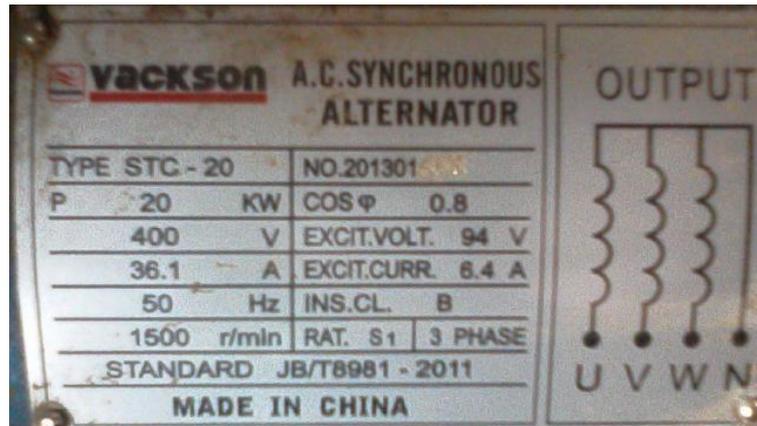


Figura 4.12 – Generatore

Il generatore è dotato di un interruttore di circuito e voltmetro.

Ci sono due principali elementi che comportano il non funzionamento dell'impianto idroelettrico:

- Condotta forzata;
- Turbina.

4.3 LA CONDOTTA FORZATA

Le condotte forzate degli impianti idroelettrici sono le opere che realizzano il raccordo altimetrico tra una vasca di monte e il macchinario idraulico della centrale idroelettrica.

Le condotte forzate sono tubazioni in pressione, di sezione circolare il cui diametro è dimensionato in base alla portata da convogliare in centrale, mantenendo entro un determinato limite la velocità dell'acqua all'interno della condotta per contenere le perdite di carico del sistema. Le condotte forzate possono essere costruite con diverso materiale:

- Acciaio;
- Cemento armato e cemento armato precompresso;
- Ghisa;
- Materiale plastico;
- Legno.

VERIFICA IDRAULICA

La condotta forzata in acciaio $\Phi 300$ ha una lunghezza di 250 m ed un dislivello di 95 m. La condotta è formata da lamiere aventi uno spessore di 3mm piegate e saldate a flangia fissa.

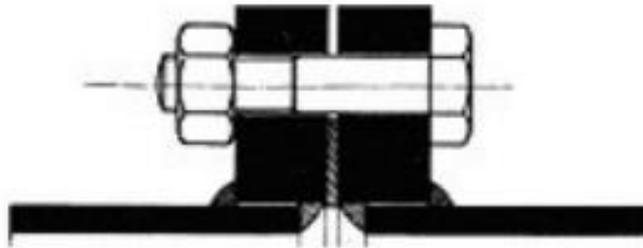


Figura 4.13 – Tipo di giunto delle tubazioni in acciaio

La stima delle perdite di carico è stata eseguita utilizzando la nota formula di Gauckler – Strickler in condizioni di massima portata:

$$\Delta h = \frac{L}{k_s^2 \cdot A^2 \cdot R_h^{4/3}} \cdot Q^2$$

Dove:

L è la lunghezza della condotta [m];

k_s è il coefficiente di scabrezza di Strickler [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$];

Materiale dei tubi e loro specificazioni: tipo di rivestimento e stato delle pareti	γ [m ^{1/2}]	m [m ^{1/2}]	k [m ^{1/3} ·s ⁻¹]	ϵ [mm]
Vetro	—	—	—	0,001 + 0,002
<i>Materie plastiche</i> polivinil cloruro - polietilene - polipropilene	—	—	—	0,002 - 0,004
<i>Metalli colorati</i> rame - ottone - piombo alluminio	— —	— —	— —	0,004 + 0,01 0,015 + 0,05
<i>Cemento amianto</i> vecchi e nuovi	0,06	0,10	110 + 100	0,10 + 0,15
<i>Acciaio (tubi trafilati)</i> tipo Mannesmann, nuovi tipo Mannesmann, in servizio corrente bitumati, nuovi bitumati, centrifugati, nuovi, giunti Gibault, d < 350 mm	0,10 0,16 0,10 —	0,16 0,23 0,16 —	95 83 95 —	0,2 + 0,5 0,6 + 1,2 0,2 + 0,5 0,01
<i>Acciaio (tubi saldati)</i> non rivestiti, nuovi	0,06	0,10	110 + 100	0,10 + 0,15
bitumati o catramati a freddo, nuovi bitumati a caldo catramati, in servizio corrente	0,10 — 0,16	0,16 — 0,23	95 — 83	0,2 + 0,5 0,025 + 0,04 0,6 + 1,2
<i>Lamiere (tubi chiodati)</i> chiodatura long. doppia, giunti conici chiodatura long. doppia, trasv. semplice, giunto cilindrico in servizio corrente chiodatura long. tripla o quadrupla, trasversale doppia	0,16 0,20 0,29	0,23 0,275 0,375	83 75 65	0,6 + 1,2 1,5 + 2,0 3,5 + 6
<i>Ghisa</i> nuovi in servizio corrente, qualunque diametro in servizio da diversi anni in servizio da molti anni, fortemente incrostati e tubercolizzati centrifugata fusa verticalmente bitum. o catram. per immersione, d < 400 mm in servizio corrente	0,16 0,23 0,29 0,36 0,23	0,23 0,29 0,375 0,45 0,29	83 73 65 60 73	0,6 + 1,2 2 + 4 3,5 + 0,6 6 + 10 2 + 4
<i>Cemento</i> lisciato accuratamente, d < 200 mm ben lisciato (acqua limpida), d > 400 mm ben lisciato curve strette (acqua non limpida), d < 400 mm centrifugato armato costruito fuori opera, in servizio corrente, d > 600 mm armato costruito fuori opera, in servizio corrente, 400 < d < 600 mm	0,12 0,18 0,23 — 0,10 0,12	0,175 0,25 0,29 — 0,16 0,175	90 80 73 — 95 90	0,4 + 0,7 1,2 + 1,8 2 + 4 0,16 0,2 + 0,5 0,4 + 0,7
<i>Gres</i> nuovi in servizio da anni	0,18 0,25	0,25 0,35	80 68	1,2 + 1,8 2,5 + 4,5

Tabella 4.1 – Valori dei coefficienti scabrezza per tubazioni

Q è la portata massima [m³/s];

A è la sezione trasversale della condotta [m²];

R_h è il raggio idraulico [m];

Nelle condotte in pressione a sezione circolare:

$$R_h = \frac{D_i}{4}$$



$D [m]$	0.300
$s [m]$	0.003
$A [m^2]$	0.07069
$L [m]$	250
$D_i [m]$	0.294
$R_h [m]$	0.0735
$Q [m^3/s]$	0.030
$k [m^{1/3/s}]$	105
$\Delta h [m]$	0.133

Tabella 4.2 – Calcolo perdite di carico tramite la formula di Gaukler-Strickler

Il valore ottenuto precedentemente viene aumentato del 3% per considerare le perdite localizzate lungo il tracciato. Le perdite di carico totale della condotta forzata in condizioni di massima portata sono 0.137 m.

Tuttavia il problema della condotta forzata è legato alle flange utilizzate per questo tipo di giunto, in quanto sono troppo sottili e dissipano gran parte della portata convogliata: il 100% a metà carico.

POSSIBILI INTERVENTI SULLA CONDOTTA FORZATA

Una possibile soluzione alla problematica, potrebbe essere la costruzione di una nuova condotta forzata in materiale plastico.

Da alcune decine d'anni l'industria produce numerosi tipi di materiali plastici, a base di resine sintetiche costituite da macromolecole di composti del carbonio, quali polistirolo, polietilene, polipropilene, cloruro di polivinile ecc. Le condotte in materiale plastico presentano caratteristiche ben diverse da quelle delle classiche tubazioni in materiale metallico e lapideo:

- notevole resistenza alla corrosione chimica da parte di acidi, alcali, liquidi inorganici;
- l'inerzia alla 'azione di terreni corrosivi e delle correnti vaganti; la ridotta scabrezza, dovuta alla superficie liscia delle pareti, alla resistenza alle incrostazioni ed al minimo invecchiamento del tubo;
- il ridotto valore della celerità di propagazione delle perturbazioni di moto vario elastico, con conseguente possibile attenuazione dei fenomeni di colpo d'ariete;
- la leggerezza con conseguenti facilitazione nel trasporto e nella posa in opera;

- la flessibilità, con conseguente adattabilità del tubo alla configurazione del terreno di posa e capacità di assorbire eventuali assestamenti di esso senza problemi per le giunzioni.

D'altronde, devono essere tenuti presente alcuni fattori limitativi dell'uso delle condotte in materiale sintetico:

- caratteristiche meccaniche largamente inferiori a quelle dei tubi metallici;
- il comportamento viscoelastico dei materiali termoplastici che, sottoposti a sollecitazioni meccaniche costanti, mostrano un incremento di deformazioni nel tempo, tanto maggiore quanto più elevata è la temperatura di esercizio (fenomeno dello scorrimento viscoso o “creep”).

La nuova condotta forzata è stata progettata in PE 100 - SDR 11 - PN 16. Le tubazioni hanno una lunghezza di 6 metri e collegati da manicotti elettrosaldabili in PE100 –SDR11.



Figura 4.14– Tubi in PE100



Figura 4.15 – Manicotto elettrosaldabile in PE100



Il polietilene è un materiale molto leggero e uno dei materiali più presenti nella nostra vita quotidiana. Le principali caratteristiche sono:

- Resistenza eccellente della corrosione e ai prodotti chimici;
- Resistenza eccellente all'abrasione;
- Resistenza agli urti;
- Basso coefficiente d'attrito;
- Facilmente saldabile;
- Buona lavorabilità;
- Stabilità dimensionale.

La stima delle perdite di carico è stata eseguita utilizzando la nota formula di Gauckler – Strickler in condizioni di massima portata:

$$\Delta h = \frac{L}{k_s^2 \cdot A^2 \cdot R_h^{4/3}} \cdot Q^2$$

<i>D [m]</i>	0.280
<i>s [m]</i>	0.025
<i>A[m²]</i>	0.06158
<i>L[m]</i>	250
<i>Di[m]</i>	0.23
<i>Rh[m]</i>	0.0575
<i>Q [m³/s]</i>	0.030
<i>k[m^{1/3}/s]</i>	105
<i>Δh [m]</i>	0.243

Tabella 4.3 - Calcolo perdite di carico tramite la formula di Gauckler-Strickler

Le perdite di carico distribuite sono maggiori rispetto alla condotta in acciaio. Il valore ottenuto precedentemente viene aumentato del 3% per considerare le perdite localizzate lungo il tracciato. Le perdite di carico totale della condotta forzata in condizioni di massima portata sono 0.25 m.

Il salto lordo disponibile è 101 m considerando un riempimento del 90% della vasca di carico, ma a questo valore vanno sottratte le perdite di carico:

$$H = 100 \text{ m}$$

È possibile calcolare la pressione in esercizio:



$$P = H \cdot \rho \cdot g \text{ [bar]}$$

Per la verifica della tubazione, è necessario aggiungere alla pressione in esercizio, le sovrappressioni di moto vario. Queste ultime sono quelle legate al colpo d'ariete, che si verifica anche nelle condotte forzate che alimentano le centrali idroelettriche quando è necessario fermare una turbina. Chiudendo il flusso d'acqua si aziona dapprima il tegolo deviatore per alleggerire il carico sulle pale, e si riduce gradualmente il flusso per evitare il colpo d'ariete. Questa sovrappressione è tanto più importante quanto è veloce la manovra di chiusura.

Una manovra lenta determina una sovrappressione limitata. La manovra può essere considerata lenta quando il tempo di chiusura è superiore a τ :

$$\tau = \frac{2 \cdot L}{a} = 0.39 \text{ s}$$

Dove:

L è la lunghezza della condotta forzata;

a è la celerità di propagazione dell'onda di sovrappressione, definita dalla relazione:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{D}{s} \cdot \frac{\varepsilon}{E}}}$$

Dove:

a è la velocità di propagazione della perturbazione [m/s];

ε è il modulo di compressibilità del fluido [N/m²];

ρ è la densità dell'acqua [kg/m³];

D è il diametro nominale (esterno) del tubo [m];

s è lo spessore della tubazione [m];

E modulo di elasticità della tubazione [N/m²];

In caso di manovra istantanea, caso sfavorevole, vale la formula di Allievi:

$$\Delta H = \frac{a \cdot V_0}{g}$$



Dove:

ΔH è la sovrappressione in colonna d'acqua [m];

V_o è la velocità del fluido a regime dentro la condotta [m/s];

È stata calcolata la pressione massima alla quale è sottoposta la condotta in PE, considerando una portata massima convogliata di 30 l/s.

Diametro esterno	D [m]	0.280
Spessore	s [m]	0.025
Sezione trasversale	A_o [m ²]	0.06158
Portata	Q_o [m ³ /s]	0.030
Velocità	V_o [m/s]	0.487
Lunghezza	L [m]	250
Densità dell'acqua	ρ [kg/m ³]	997
Modulo elastico dell'acqua	ε [N/m ²]	220000000
Modulo elastico	materiale tubazione	PE
	E [N/m ²]	1.00E+09
Velocità di propagazione della perturbazione	a [m/s]	293.36
tempo di manovra	T [s]	1.70
	Δh_{max} [m]	14.57
Sovrappressione	Δp_{max} [bar]	1.43
	H_o [m]	97.9
Pressione in condizioni idrostatiche	P_o [bar]	9.58
	H_{max} [m]	112.47
Pressione massima	P_{max} [bar]	11.00

Tabella 4.4 - Calcolo pressione massima



La pressione massima è inferiore al limite indicata dal costruttore di tubazioni in PE100 –PN16. PN è la pressione nominale, è un elemento caratteristico della produzione dei componenti (pressione massima a cui un componente può essere sottoposto in esercizio) e deve essere almeno pari alla somma della massima pressione interna in asse condotta, delle sovrappressioni di moto vario e della pressione equivalente alle sollecitazioni esterne a cui il sistema sarà sottoposto.

Un'altra possibile soluzione alla problematica della condotta forzata senza intaccare la tubazione esistente, potrebbe essere la costruzione di 2 condotte forzate in materiale plastico, in parallelo ed utilizzare la condotta esistente come camicia. Sono state ipotizzate due condotte in PE100 Ø140 PN 16.

La stima delle perdite di carico distribuite per ogni condotta, è stata eseguita utilizzando la nota formula di Gauckler – Strickler considerando metà portata:

$$\Delta h = \frac{L}{k_s^2 \cdot A^2 \cdot R_h^{4/3}} \cdot Q^2$$

D [m]	0.140
s [m]	0.013
A[m²]	0.01539
L[m]	250
Di[m]	0.114
Rh[m]	0.0285
Q [m³/s]	0.015
k[m^{1/3}/s]	105
Δh [m]	2.473

Tabella 4.5 - Calcolo perdite di carico tramite la formula di Gauckler-Strickler

In questo caso le perdite di carico per ogni singola condotta sono molto più elevate rispetto al caso precedente, inoltre bisogna anche considerare perdite localizzate dovute all'aggiunta di pezzi speciali come biforcazioni che incidono significativamente sulle perdite totali della condotta.

Per evitare opere di scavo e demolizione, si è pensato anche al rivestimento delle condotte per riparare e risanare la condotta forzata. Il rivestimento condotte realizza una tubazione nuova all'interno della linea difettosa che forma un tutt'uno con quello esistente, ripristinandone la tenuta idraulica e, in taluni casi, la funzionalità strutturale. Tale operazione, detta anche relining, consiste nel rivestire dall'interno il tubo esistente (facendone prendere la sua forma) con una guaina impregnata di resina che solidificandosi garantisce una nuova condotta durevole e sicura.



Figura 4.16 – Relining

Con il rivestimento condotte il diametro del tubo viene ridotto di pochi millimetri. La scelta dello spessore del rivestimento varia a seconda di alcuni fattori (diametro, pressione di esercizio, stato di fatto, carico ecc.), questo non ha nessuna influenza sulla portata, anzi la superficie interna risulta molto levigata tale da aumentare la scorrevolezza dei fluidi.

Fasi di lavoro:

- Ispezione televisiva preliminare;
- Predisposizione e impregnazione del tubolare;
- Inserimento nella tubazione del tubolare impregnato;
- Polimerizzazione della resina mediante ciclo di riscaldamento dell'acqua o dell'aria;
- Taglio del tubolare in corrispondenza dei pozzetti;
- Sigillatura del tubolare in corrispondenza pozzetti/ispezioni esistenti;
- Ispezione televisiva infinita.

ISPEZIONE TELEVISIVA PRELIMINARE

Il controllo del grado di pulizia della condotta e la verifica dell'assenza di qualsiasi deposito che potrebbe ostacolare il corretto risanamento, verrà eseguito con carrello motorizzato o telecamera ad avanzamento manuale, con registrazione digitale.

PREDISPOSIZIONE E IMPREGNAZIONE DEL TUBOLARE

Lo spessore della guaina sarà adeguato al diametro e alle caratteristiche della tubazione. L'impregnazione del tubolare avviene con resina termoindurente preventivamente miscelata con additivi catalizzatori. La corretta e uniforme impregnazione è assicurata da un processo di realizzazione e controllo di sottovuoto del tubolare che consente di eliminare qualsiasi bolla d'aria interna. Il tubolare viene successivamente pressato in una rulliera per assicurare l'omogeneità

dell'impregnazione. In caso di risanamenti di grande entità l'impregnazione avviene nella sede. La preparazione del rivestimento viene eseguita mediante l'impiego di bacini di premiscelazione, sistemi di generazione del vuoto e calandre idrauliche. Attraverso camion frigoriferi, le guaine vengono trasportate in cantiere e messe a disposizione della squadra che provvederà all'inserimento nella condotta da sottoporre a relining. Durante il trasporto, le guaine sono adeguatamente mantenute alle temperature previste, attraverso sistemi per il controllo dell'ambiente refrigerato.

Figura 4.17 – Tubolare pressato



INSERIMENTO NELLA CONDOTTA DEL TUBOLARE IMPREGNATO

Nel sistema di inversione ad aria, il tubolare viene introdotto in un apposito tamburo, tramite un sistema ad aria compressa, la guaina viene invertita e srotolata all'interno della tubazione. La pellicola in pvc della quale è rivestito il tubolare verrà a trovarsi nella parte interna della tubazione e consentirà di evitare il contatto dell'acqua con la resina durante la fase di polimerizzazione. La parte del tubolare costituito dal feltro impregnato di resina andrà invece ad aderire alla parete della tubazione.



Figura 4.18 – Inserimento nella condotta del tubolare impregnato

POLIMERIZZAZIONE DELLA RESINA MEDIANTE CICLO DI RISCALDAMENTO DELL'ACQUA O DELL'ARIA

Polimerizzazione con aria: L'aria viene riscaldata con caldaia apposita e fatta circolare per consentire la polimerizzazione del rivestimento.



Figura 4.19 – Polimerizzazione con aria

TAGLIO DEL TUBOLARE IN CORRISPONDENZA DEI POZZETTI/ISPEZIONI

Terminato il processo di catalisi della resina, si provvede al taglio in corrispondenza dei pozzetti/ispezioni mediante seghe pneumatiche o mole ad aria per ripristinare le canalette o le ispezioni. In corrispondenza dei pozzetti/ispezioni di partenza e di arrivo il taglio sarà radiale, ossia viene praticato lungo tutta la circonferenza della tubazione. In questo caso il taglio viene effettuato lasciando una piccola sporgenza di controtubo, per consentire la successiva sigillatura.

SIGILLATURA DEL TUBOLARE IN CORRISPONDENZA POZZETTI/ISPEZIONI ESISTENTI

Si procede alla sigillatura dell'intercapedine tra la tubazione esistente ed il tubolare in corrispondenza dei pozzetti/ispezioni mediante prodotti a base cementizi o resinosi.

ISPEZIONE TELEVISIVA FINALE

per il controllo della perfetta esecuzione dell'intervento di risanamento.

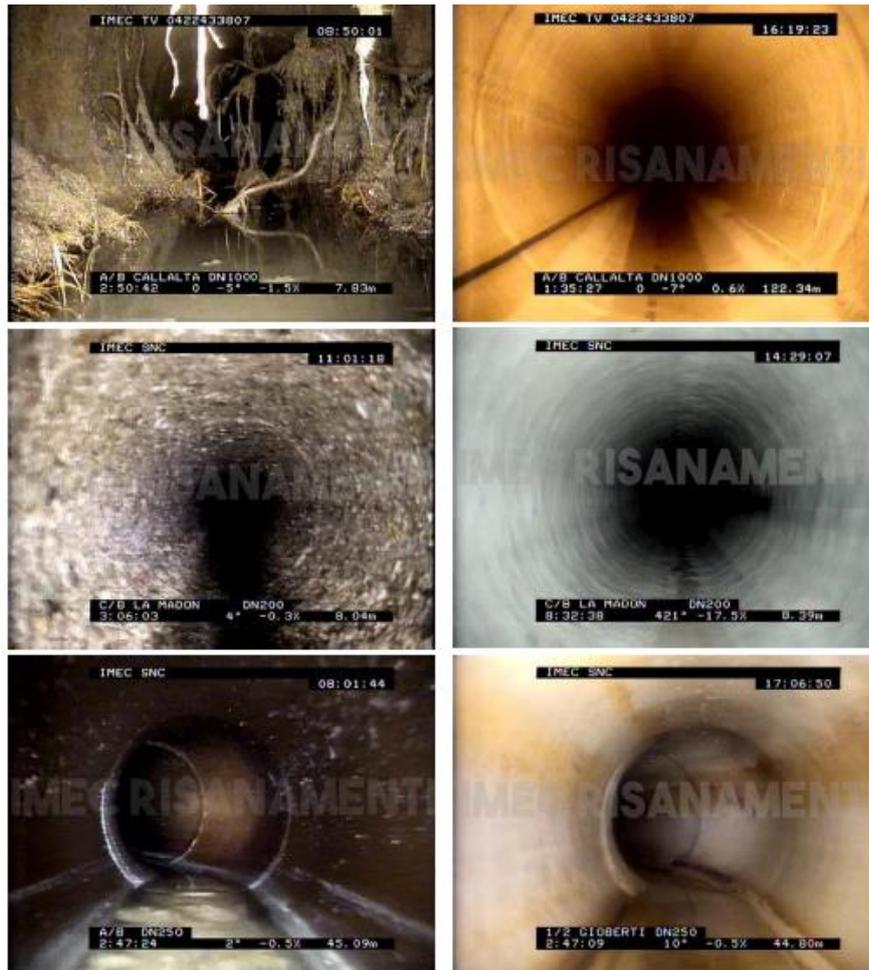


Figura 4.20 – Esempi di condotte stradali



4.4 ANALISI TECNICA DI NON FUNZIONAMENTO DELLA TURBINA¹²

Le turbine idrauliche hanno lo scopo di trasformare l'energia potenziale e cinetica dell'acqua in energia meccanica di rotazione.

La potenza idraulica a disposizione della turbina è data da:

$$P_k = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad [W]$$

dove:

ρ è il peso specifico dell'acqua [kg/m³]

Q è la portata volumetrica [m³/s]

g è l'accelerazione di gravità [m/s²]

H è il salto netto [m]

La potenza meccanica fornita dalla turbina è data da:

$$P_m = P_k \cdot \eta \quad [W]$$

Dove:

η è il rendimento della turbina [-]

¹² European Small Hydropower Association – ESHA 2007 – Guida alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico p. 155-156

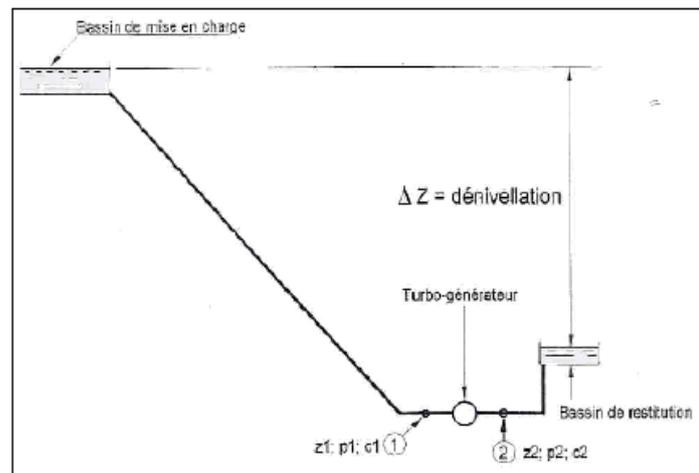


Figura 4.21 – Schema di un impianto idroelettrico e delle sezioni di misura – Fonte: Guida alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico ESHA

L'energia idraulica specifica della turbina è definita come segue:

$$E = g \cdot H = \frac{1}{\rho} \cdot (\rho_1 - \rho_2) + \frac{1}{2} \cdot (c_1^2 - c_2^2) + g \cdot (z_1 - z_2) \quad [Wh]$$

dove:

p_x è la pressione nella sezione x [Pa]

c_x è la velocità dell'acqua nella sezione x [m/s]

z_x è la quota della sezione x [m]

I pedici 1 e 2 individuano le sezioni di misura rispettivamente di monte e di valle rispetto alla turbina, che sono definiti dagli standard IEC (International Electrotechnical Commission Standards).

Il salto netto è definito come:

$$H_n = \frac{E}{g} \quad [m]$$

Di seguito sono riportati i dati tecnici della turbina Cross Flow installata:



Miglior punto operativo														
η_g	η_b	h_n	B_t	D_t	q_{11}	Q_t	η_t	P_{mt}	P_e	η_{11}	η_t	ω_t	T_t	F_t
m	m	m	mm	m	-	l/s	-	kW	kW	-	RPM	rad/s	kNm	kN
0.89	0.98	25	100	0.3	0.8	428	0.76	80	70	38	633	66.29	1.2	8.02

Tabella 4.6 - Specifiche turbina in condizioni ottimali

Flusso parziale														
η_g	η_b	h_n	B_t	D_t	q_{11}	Q_t	η_t	P_{mt}	P_e	η_{11}	η_t	ω_t	T_t	F_t
m	m	m	mm	m	-	l/s	-	kW	kW	-	RPM	rad/s	kNm	kN
0.89	0.98	25	100	0.3	0.7	368	0.74	67	58	38	633	66.29	1.01	6.7
0.89	0.98	25	100	0.3	0.65	341	0.72	60	53	38	633	66.29	0.91	6.06
0.89	0.98	25	100	0.3	0.6	315	0.7	54	47	38	633	66.29	0.82	5.44
0.89	0.98	25	100	0.3	0.55	289	0.68	48	42	38	633	66.29	0.73	4.84

Tabella 4.7 - Specifiche turbina in condizioni di flusso parziale

B_t = larghezza ingresso canale

η_b = efficienza della cinghia

η_t = efficienza della turbina

h_n = prevalenza netta

n_t = velocità turbina

P_{mt} = potenza meccanica turbina / albero

Q_t = flusso / scarico

T_t = coppia albero

D_t = diametro guida

η_g = rendimento del generatore

F_t = forza dell'albero

n_{11} = velocità unitaria

ω_t = velocità in radianti della turbina

P_e = potenza elettrica / potenza del generatore

q_{11} = portata unitaria / portata

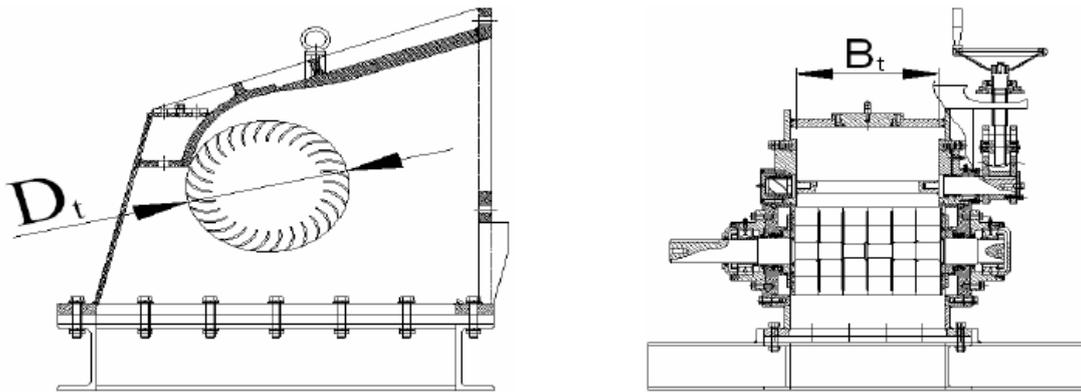


Figura 4.22 – Turbina Cross-Flow

L'impianto idroelettrico progettato, dovrebbe turbinare una portata massima di 30 l/s ed utilizzare un salto di 101 m. La turbina installata, invece, lavora con un salto netto di 25 metri ed inoltre la portata turbinabile è nettamente superiore sia in condizioni ottimali che in caso di flusso parziale (tra 428 e 289 l/s).

Considerando un dislivello di 101 metri e una portata che oscilla tra 30 e 22 l/s, è stata calcolata la potenza idraulica a disposizione della turbina con la seguente formula:

$$P_k = \gamma \cdot Q \cdot H \quad [W]$$

Q [m ³ /s]	γ [N/m ³]	H [m]	P _k [W]	P _k [kW]
0.022	9819	101	21818	22
0.024	9819	101	23801	24
0.026	9819	101	25785	26
0.028	9819	101	27768	28
0.03	9819	101	29752	30

Tabella 4.8 - Potenza idraulica reale



Partendo dalla potenza meccanica, riportata nelle tabelle 4.6 e 4.7, è stata ricavata la potenza idraulica a disposizione della turbina considerando il salto netto e la portata turbinabile utilizzata dal costruttore della turbina esistente.

$$P_k = \frac{P_{mt}}{\eta_t}$$

P_{mt} kW	η_t -	P_k [kW]
80	0.76	105
67	0.74	91
60	0.72	83
54	0.7	77
48	0.68	71

Tabella 4.9 - Potenza idraulica considerata nel progetto

Confrontando i risultati, si nota che la potenza idraulica a disposizione della turbina è stata sopravvalutata nella scelta della macchina.



4.5 LA SCELTA DELLA TURBINA¹³

La progettazione preliminare e la scelta della turbina sono entrambi processi iterativi. Il tipo, la geometria e le dimensioni di una turbina sono condizionati essenzialmente dai seguenti parametri:

- Salto netto;
- Portata da turbinare;
- Numero di giri caratteristico;
- Velocità di rotazione;
- Problemi di cavitazione;
- Velocità di fuga;
- Costo.

SALTO NETTO

Il salto lordo è la distanza verticale tra il livello del pelo acqua alla presa e quello nel canale di scarico – nelle turbine a reazione - oppure tra il livello del pelo acqua alla presa e quello dell'asse dei getti – nelle turbine ad azione. Mentre il salto netto è il rapporto tra l'energia idraulica specifica della macchina e l'accelerazione di gravità. Il primo criterio da prendere in considerazione nella scelta della turbina è il salto netto.

Tipo di turbina	Campo dei salti
Kaplan and elica	$2 < H_n < 40$
Francis	$25 < H_n < 350$
Pelton	$50 < H_n < 1'300$
Crossflow	$5 < H_n < 200$
Turgo	$50 < H_n < 250$

Tabella 4.10 – Valori di salto

¹³ European Small Hydropower Association – ESHA 2007 – Guida alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico p. 174- 179

PORTATA

Un unico valore di portata non ha significato; è necessario conoscere il regime delle portate ottenuto da dati idrometrici o studi idrologici. La portata stimata e il salto netto determinano l'insieme delle turbine idonee al sito e alle condizioni ambientali. Le turbine idonee sono quelle per cui la portata disponibile e il salto netto individuano un punto che ricade all'interno del campo di funzionamento. Se il punto ricade all'interno del campo di funzionamento di diverse turbine, sarà necessario valutare la capacità installata e la producibilità in rapporto ai costi per poter prendere una decisione. Bisogna però ricordare che il campo di funzionamento di un tipo di turbina varia a seconda del costruttore.

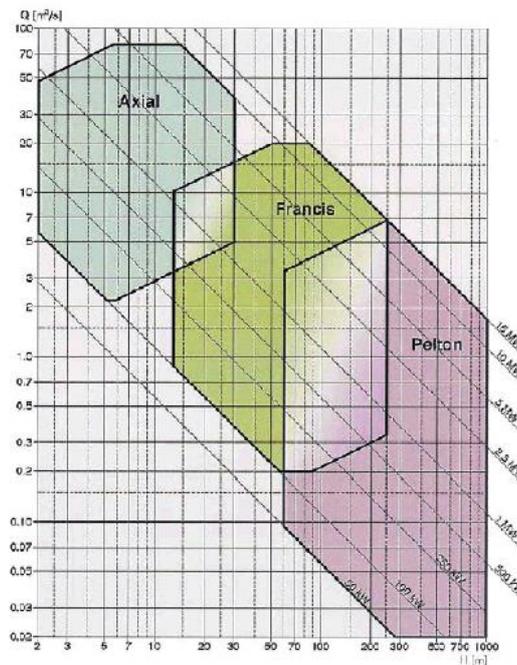


Figura 4.23 – Esempio campo di applicazione dei diversi tipi di turbina

Dal momento che una turbina può lavorare solo con valori di portata compresi tra un massimo e un minimo tecnico, potrebbe risultare vantaggioso installare alcune piccole turbine al posto di una sola più grande. In questo caso le turbine vengono avviate in modo sequenziale, cosicché tutte quelle in funzione, tranne una, lavorano alla portata nominale e perciò garantiscono alti rendimenti. Inoltre, se si opta per utilizzare 2 o 3 piccole turbine, ciascuna unità avrà un peso minore e pertanto le operazioni di trasporto e di installazione risulteranno più facili. Infine la ripartizione della portata tra due o più turbine consente a ciascuna di avere una velocità di rotazione maggiore, riducendo la necessità di un moltiplicatore di giri.



Tipo di turbina	Tolleranza per variazioni di portata	Tolleranza per variazioni di salto
Pelton	Alta	Bassa
Francis	Media	Bassa
Kaplan a doppia regolazione	Alta	Alta
Kaplan a singola regolazione	Alta	Media
Elica	Bassa	Bassa

Tabella 4.11 - Tolleranza rispetto alla variazione di portata e di salto

NUMERO DI GIRI CARATTERISTICO

Il numero di giri caratteristico costituisce un eccellente criterio di selezione delle turbine, senza dubbio maggiormente preciso dei campi di funzionamento.

Il numero di giri caratteristico di una turbina è definito come:

$$\eta_{QE} = \frac{\eta \cdot \sqrt{Q}}{E^{3/4}} \quad [-]$$

Dove:

Q è la portata $[m^3/s]$;

E è l'energia idraulica specifica della macchina $[J/kg]$;

η è la velocità di rotazione della turbina $[s^{-1}]$.

In generale, i costruttori di macchine dichiarano il numero di giri caratteristico delle loro macchine.

VELOCITÀ DI ROTAZIONE

La velocità di rotazione di una turbina è funzione del numero di giri caratteristico, della portata e del salto netto. Nei piccoli impianti si è soliti impiegare generatori standard, per cui, nello scegliere la turbina, si deve tenere conto delle possibili velocità di sincronismo, sia che essa sia accoppiata direttamente al generatore sia che venga interposto un moltiplicatore di giri.



CAVITAZIONE

Quando la pressione in un liquido in movimento scende sotto la sua tensione di vapore, ha luogo l'evaporazione del liquido. Questo fenomeno dà luogo alla formazione di un gran numero di piccole bolle, che sono trasportate fuori dalla zona a bassa pressione dal movimento e collassano quando giungono nella zona di pressione maggiore. La formazione di queste bolle ed il loro collasso è ciò che viene definito cavitazione. L'esperienza insegna che questo fenomeno crea degli impulsi di pressione molto elevati, accompagnati da forte rumore (una turbina che cavitava fa un rumore come se fosse attraversata da ghiaia). L'azione continua ripetuta di queste pressioni a carattere impulsivo produce sulle pale della girante e sul mozzo una specie di erosione diffusa, formando cavità nel metallo ("pitting"). Col tempo questa erosione provoca formazione di cricche tra le cavità, con asportazione del metallo. Le temperature elevate generate dagli impulsi di pressione e la presenza di ossigeno nei gas rilasciati aggravano il fenomeno, dando origine a corrosione, cosicché in un tempo relativamente breve la turbina risulti seriamente danneggiata e debba essere fermata e riparata, se si è intervenuti in tempo.

In ogni caso la cavitazione non è qualcosa d'inevitabile. La sperimentazione in laboratorio consente di mettere a punto un'adeguata progettazione idraulica delle turbine e di definire il loro campo di funzionamento, elementi che aiutano entrambi ad evitare che si verifichi questo fenomeno.

L'esperienza dimostra che esiste un coefficiente di cavitazione, chiamato σ di Thoma, che definisce con sufficiente precisione i parametri che danno luogo alla cavitazione. Questo coefficiente, secondo gli standard IEC 60193, è dato dall'equazione:

$$\sigma = \frac{NPSH}{g \cdot H}$$

Nella quale H è il salto netto dell'impianto e $NPSH$ (Net Positive Suction Head) è l'energia d'aspirazione netta definita come:

$$NPSH = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho} + \frac{V^2}{2} - g \cdot H_s$$

Dove:

P_{atm} è la pressione atmosferica [Pa];

P_v è la tensione di vapore [Pa];



H_s è l'altezza d'aspirazione, pari alla distanza tra il pelo acqua nel canale di restituzione e la sezione critica (asse di rotazione delle macchine ad asse orizzontale, piano di riferimento di quelle ad asse verticale) [m];

V è la velocità media nel canale di scarico [m/s];

g è l'accelerazione di gravità [m/s²];

ρ è la densità dell'acqua [kg/m³].

Per non avere cavitazione e quindi la formazione di vortici e afflusso non uniforme, la turbina dovrebbe essere installata a un'altezza H_s sopra il livello minimo del pelo d'acqua nel canale di restituzione pari a:

$$H_s = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} - \sigma \cdot H \quad [m]$$

Il valore σ di una turbina è una funzione del numero di giri caratteristico e dovrebbe essere fornito dal costruttore.

VELOCITÀ DI FUGA

Ciascun tipo di turbina è caratterizzata da una velocità di fuga, che è la massima velocità che essa può teoricamente raggiungere in caso di distacco del carico (per l'apertura dell'interruttore di parallelo o per un guasto all'eccitazione) in un momento in cui il gruppo idroelettrico sta lavorando al massimo carico.

A seconda del tipo di turbina, la velocità di fuga può risultare circa il doppio o il triplo della velocità nominale (minima velocità a cui la turbina arriva a produrre una potenza nominale dichiarata dal costruttore). Si deve tener presente che all'aumentare della velocità di fuga aumenta il costo del generatore e del moltiplicatore di giri, i quali debbono essere progettati per resistere alle sollecitazioni indotte da questa possibile situazione.

L'energia potenziale dell'acqua si converte in energia meccanica nella turbina per mezzo di meccanismi fondamentalmente diversi.

- Nel primo, la pressione dell'acqua agisce direttamente sulla superficie delle pale, diminuendo di valore man mano che avanza. Le turbine che operano in tal modo si

definiscono “a reazione”. La cassa turbina deve essere abbastanza robusta poiché, con la ruota completamente sommersa, è sottoposta alla pressione di monte dell’acqua. Le turbine Francis e Kaplan appartengono a questa categoria.

- Nel secondo, l’energia potenziale si trasforma totalmente in energia cinetica in un ugello che proietta la vena liquida ad alta velocità contro le pale, montate sulla periferia della girante. Le turbine che operano in questo modo sono chiamate “turbine ad azione”. Poiché l’acqua, dopo che ha colpito le pale, cade nel canale di scarico con piccola energia residua, la cassa turbina può essere leggera e ha solo lo scopo di evitare danneggiamenti e la fuoriuscita dell’acqua. Le più comuni turbine ad azione sono le Pelton.

TURBINE AD AZIONE¹⁴

TURBINE PELTON

Le turbine Pelton sono turbine ad azione nelle quali uno più getti d’acqua urtano contro le numerose pale a cucchiaio montate sulla periferia della girante.

Ogni ugello crea un getto, la cui portata è regolata da una valvola a spillo (figura 4.10). Queste turbine sono solitamente utilizzate solo per salti più alti di 60 m, fino a salti di anche più di 1000 m. Il piano degli ugelli è sempre quello meridiano della girante. In caso di fermo d’emergenza delle turbine (ad esempio in caso di distacco del carico), il getto può essere deviato da un tegolo deflettore, in modo che non colpisca le pale, per evitare che la girante vada in fuga. In questo modo la valvola di macchina può essere chiusa lentamente e le sovrappressioni che si generano nella condotta sono mantenute entro valori accettabili.

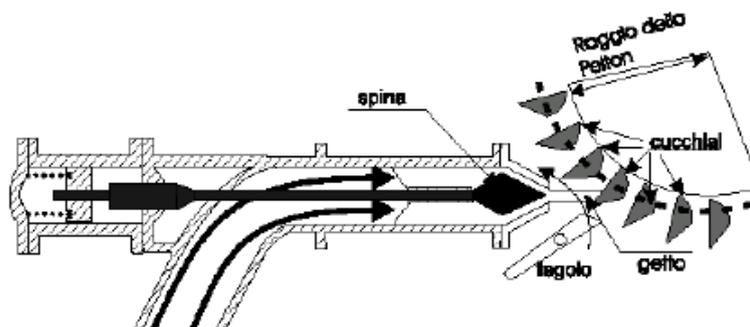


Figura 4.24 – Sezione trasversale di un ugello con deflettore

¹⁴ European Small Hydropower Association – ESHA 2007 – Guida alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico p. 156-160

Dal momento che l'energia cinetica che esce dalla girante va persa, le pale a cucchiaio sono progettate in modo da rendere minima la velocità di uscita dell'acqua (idealmente velocità zero).

Le turbine Pelton a uno o due getti possono essere ad asse orizzontale o verticale, mentre quelle a tre o più getti hanno sempre asse verticale.

La girante della turbina è di solito accoppiata direttamente con l'albero del generatore e deve essere collocato più in alto rispetto alla quota di restituzione dell'acqua. Il rendimento di una Pelton è buona per valori di portata tra il 30% e il 100% della portata massima di progetto, se la turbina è ad 1 getto, e tra il 10% e il 100% della portata massima di progetto, se la turbina è multigetto.



Figura 4.25 – Girante di una turbina Pelton

TURBINE TURGO

La turbina Turgo può lavorare con salti tra i 50 e 250 m. Come la Pelton è una turbina ad azione, però le sue pale hanno forma diversa e il flusso le colpisce con un angolo di 20° rispetto al piano mediano della ruota. L'acqua entra nella girante da un lato e ne esce dall'altro. Questo tipo di turbina può lavorare con portate tra il 20% e il 100% della portata massima di progetto. Complessivamente il rendimento è minore rispetto a quelle delle turbine Pelton e Francis.

A differenza della turbina Pelton, nella turbina Turgo il getto colpisce simultaneamente più pale, similmente a quanto avviene in una turbina a vapore. Il volume di acqua che una turbina Pelton può elaborare è limitato dal fatto che il flusso di ogni ugello possa interferire con quelli adiacenti,

mentre la turbina Turgo non soffre di questo inconveniente, inoltre a parità di portata e di salto la Turgo ha una velocità di rotazione più alta.

Una turbina Turgo può essere una buona alternativa ad una Francis quando la portata varia notevolmente o quando ci sono lunghe condotte, perché la presenza di un deflettore permette di evitare che la turbina vada in fuga in caso di distacco di carico e pertanto, rispetto alla Francis, il rischio di colpi di ariete diminuisce sensibilmente.

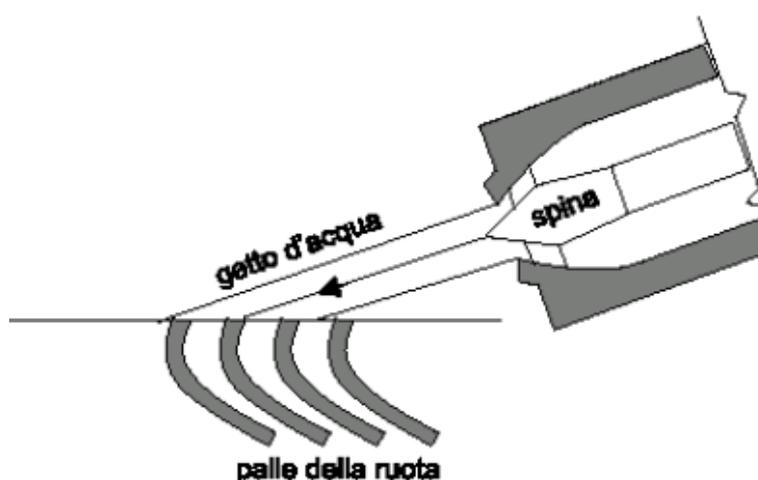


Figura 4.26– Funzionamento di una turbina Turgo

TURBINE CROSS-FLOW

Queste turbine ad azione si utilizza con una gamma molto ampia di portate (tra i 20 l/s ed i 10 m³/s) e di salti tra 5 m e i 200 m. L'acqua entra nella turbina attraverso uno o più distributori localizzati nella parte alta della girante e la attraversa due volte prima di uscire dalla turbina. La semplicità della struttura rende facili e poco costose le riparazioni e in caso di danneggiamenti alla girante dovuti ai significativi sforzi di tipo meccanico a cui è sottoposta.

Le turbine cross-flow presentano un rendimento piuttosto basso rispetto alle altre turbine e la significativa perdita di carica dovuto alla distanza tra la girante e il livello di restituzione dell'acqua deve essere tenuta in considerazione quando si lavora con salti bassi e medi. Inoltre le turbine cross-flow utilizzate su salti alti possono presentare problemi di affidabilità a causa dei forti sforzi meccanici a cui sono sottoposte.

Il loro rendimento massimo è inferiore all' 87% però si mantiene quasi costante quando la portata discende fino al 16% della nominale e possono raggiungere una portata minima teorica inferiore

del 10% della portata di progetto. Questo tipo di turbine costituisce un'alternativa interessante quando si ha acqua a sufficienza, consumi energetici definiti e scarse possibilità d'investimento, come nei programmi di elettrificazione rurale.

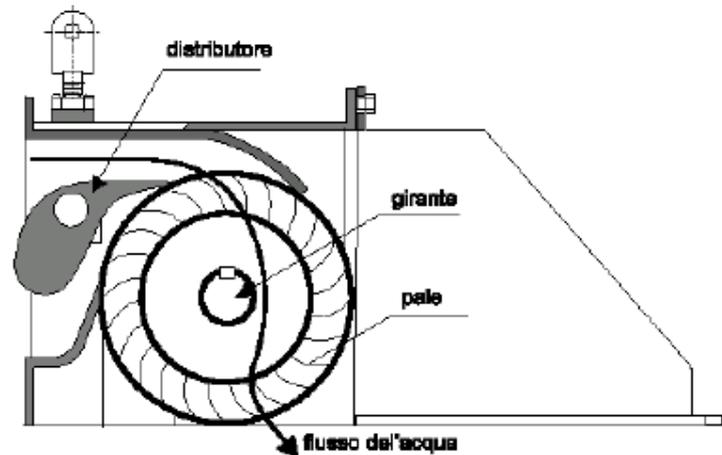


Figura 4.27 – Funzionamento di una turbina cross-flow

TURBINE A REAZIONE¹⁵

TURBINE FRANCIS

Le turbine Francis sono turbine a reazione, con girante a pale fisse e distributore a pale regolabili, utilizzate per medi salti. In queste turbine l'immissione dell'acqua è sempre radiale, mentre lo scarico è assiale. Come le Pelton, le turbine Francis possono essere ad asse verticale o orizzontale, e quest'ultima configurazione è la più comune nei piccoli impianti idroelettrici.

Le turbine Francis possono essere installate in camera libera o direttamente connesse alla condotta forzata. Sui corsi d'acqua con piccoli salti erano molto utilizzate, ma allo stato attuale per questo tipo d'impianti le turbine Kaplan costituiscono la soluzione migliore dal punto di vista tecnico ed economico.

L'acqua entra nella turbina attraverso un a cassa a spirale, realizzata in modo da mantenere costante la velocità tangenziale lungo tutto il suo sviluppo e da farle giungere al distributore radialmente. Alcune turbine Francis possono avere un distributore mobile, la cui funzione è quella

¹⁵ European Small Hydropower Association – ESHA 2007 – Guida alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico p. 160-164

di regolare la portata di acqua in ingresso nella girante e di adattare l'angolo d'ingresso del flusso dell'angolo delle pale della girante. Le pale del distributore possono ruotare sul proprio asse, azionate da bielle collegate a loro volta a un anello esterno che sincronizza il loro movimento. Questo sistema può essere utilizzato per fermare l'ingresso d'acqua alla turbina in situazioni di emergenza, benché ciò non eviti l'installazione di una valvola a farfalla all'ingresso della turbina.

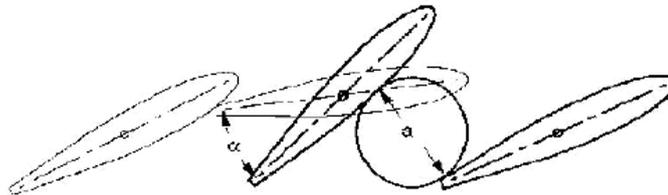


Figura 4.28 – Principio di funzionamento del distributore

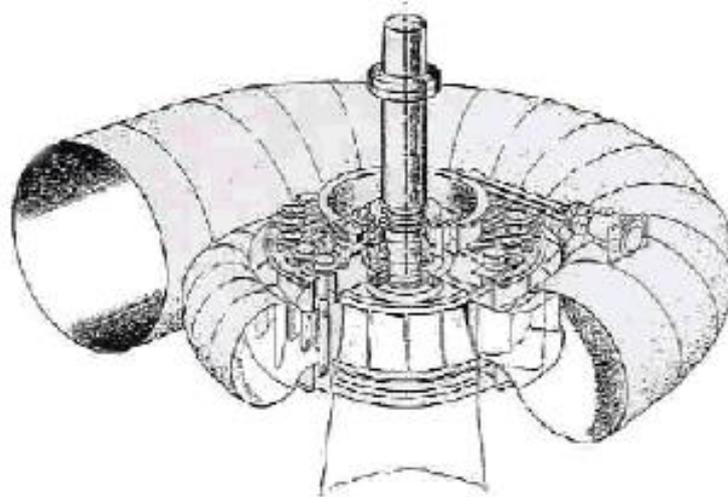


Figura 4.29 – Vista di una turbina Francis

La girante trasforma l'energia dell'acqua in energia meccanica e scarica l'acqua in direzione assiale attraverso il diffusore. In una turbina a reazione, il diffusore ha la funzione di recuperare l'energia cinetica ancora posseduta dall'acqua che viene scaricata dalla girante. Dal momento che l'energia cinetica è proporzionale al quadrato della velocità, uno degli obiettivi del diffusore è ridurre la velocità di scarico. Più basso è il salto, più è importante il ruolo del diffusore, dal momento che bassi salti implicano portate elevate la velocità residua dell'acqua all'uscita della girante è molto importante.

TURBINE KAPLAN E AD ELICA

Si tratta di turbine a reazione a flusso assiale, utilizzate generalmente per bassi salti (da 2 m a 40 m). Le pale della girante Kaplan sono sempre regolabili, mentre quelle del distributore possono essere fisse o regolabili. Quando sia le pale della turbina sia quelle del distributore sono regolabili, la turbina viene definita “doppia regolazione”; se le pale del distributore sono fisse, la turbina è “a singola regolazione”. Una Kaplan con le pale della girante fissa è chiamata turbina a elica. Queste ultime vengono utilizzate quando sia la portata che il salto rimangono praticamente costanti, che è una condizione rara nei piccoli impianti idroelettrici.

La doppia regolazione permette in qualsiasi momento di adeguare il funzionamento della girante e del distributore alle variazioni di salto e di portata. La Kaplan a doppia regolazione è quindi la più flessibile e può lavorare con portate comprese tra il 15% e il 100% della massima di progetto. Le Kaplan a singola regolazione consentono un buon adattamento alle variazioni di portata, ma sono invece meno flessibili in caso di significative variazioni di salto; di norma possono lavorare con portate comprese tra il 30% e il 100% della massima portata di progetto.



Figura 4.30 – Girante di una Kaplan

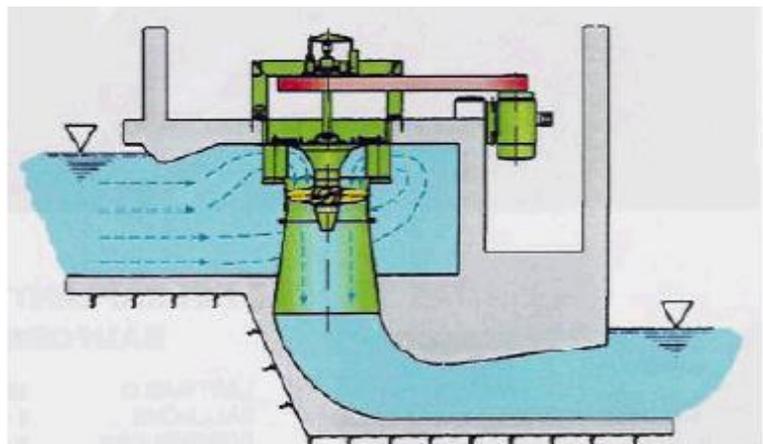


Figura 4.31 – Sezione trasversale di una Kaplan a doppia regolazione

La Kaplan a doppia regolazione illustrata nella figura 4.31 è una turbina ad asse verticale con cassa a spirale e distributore a configurazione radiale. Il flusso entra in direzione radiale e compie una svolta ad angolo retto prima di entrare nella girante in direzione assiale. Il sistema di regolazione è progettato in modo che ad ogni variazione dell’inclinazione delle pale della girante corrisponde una variazione delle pale del regolatore, allo scopo di ottimizzare il rendimento della macchina in corrispondenza di una vasta gamma di valori di portata e salto.

Le pale della girante possono ruotare con la turbina in funzione grazie a un sistema di bielle-manovelle collegate a un tirante verticale, che scorre all'interno dell'albero cavo della turbina, azionata da un servomotore idraulico.

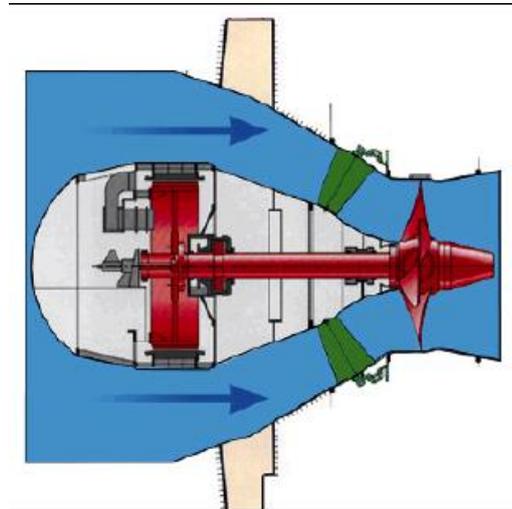


Figura 4.32 – Sezione trasversale di una turbina a bulbo a doppia regolazione

La turbina a bulbo deriva dalla Kaplan, con il generatore contenuto in una cassa impermeabile, a forma appunto di bulbo, immersa nell'acqua.

La figura 4.18 illustra una turbina nella quale tutto l'equipaggiamento (generatore e moltiplicatore di giri se, necessario) è alloggiato in un bulbo raffreddato mediante ventilazione forzata. Dal bulbo escono solo i cavi elettrici, debitamente protetti. Le turbine Kaplan sono sicuramente le macchine che consentono di realizzare il maggior numero di possibili configurazioni.

Per la sostituzione della turbina, sono stati contattati due produttori di turbine: Tschurtschenthaler Turbinenbau e Misa.

TSCHURTSCHENTHALER TURBINENBAU

Dal 1978, anno della fondazione, l'obiettivo della Tschurtschenthaler Turbinenbau è di realizzare turbine idroelettriche di alta qualità. Le Dolomiti altoatesine offrono le condizioni ideali e la giusta

ispirazione per la loro attività che comprende lo sviluppo e la produzione di impianti idroelettrici altamente prestazionali di ogni tipo (Pelton, Francis, Kaplan) e dei loro componenti, occupandosi oltremodo anche di lavori di manutenzione e riparazione. Accanto alle turbine realizzano anche macchinari specifici e piccoli componenti meccanici per più svariati campi di applicazione.

La turbina che è stata consigliata, da questa azienda, è una turbina Pelton ad 1 getto – asse orizzontale accoppiata direttamente ad un generatore asincrono di 22 o 30 kW con 1000 o 1500 giri/min. Una turbina simile è stata realizzata per una portata di 35 l/s e 85 m di salto (fig. 4.33 - 4.38).



Figura 4.33 - Montaggio scatola subacquea



Figura 4.34 – Tubo a parete e turbina



Figura 4.35 - Idraulica e controllo degli ugelli

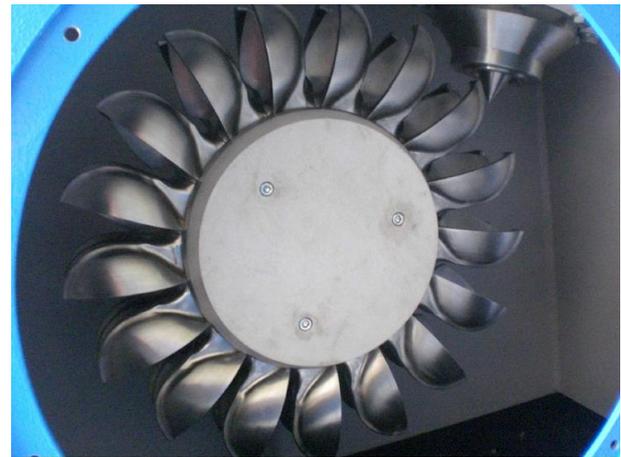


Figura 4.36 – Girante



Figura 4.37 – Sistema a turbina installato con generatore

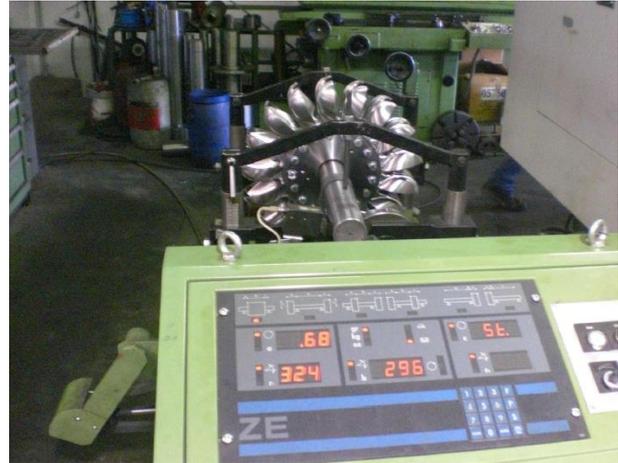


Figura 4.38 - Controllo del bilanciamento della girante

I dati tecnici della turbina sono i seguenti:

H_b	H_n	N [U/min]	D_1	P_t	P_g	d [mm]	d_o	B	z
[m]	[m]		[mm]	[kW]	[kW]		[mm]	[mm]	
101	100	1000	370	20.7	18.6	38.6	30.9	100	21

Tabella 4.12 – Dati tecnici

Dove:

Q_n è la quantità di acqua nominale;

H_b è il salto lordo;

H_n è il salto netto;

N sono i giri;

D_1 diametro girante;

P_t potenza turbina;

P_g è la potenza del generatore;

d è il diametro bocchello;

d_o è il diametro getto;

B è la larghezza pala;

z sono numero pale.



MISA

Attiva fin dal 1992 con il brand MISA, ma con un passato storico culturale formatosi in decenni di attività, MISA è una società dinamica e reattiva, con un patrimonio di esperienze e di cultura tecnica nel campo della progettazione e realizzazione di grandi impianti di sollevamento di acqua nelle molteplici applicazioni di: bonifica, irrigazione, acquedottistica, fognature industriali, acciaierie e itticoltura.

MISA è in grado di garantire soluzioni a ciclo completo, dalla progettazione, alla costruzione, alla messa in opera e al collaudo; MISA realizza inoltre, allo stesso modo, impianti per la produzione di energia idroelettrica, comprensivi di turbine idrauliche di nostra produzione e così anche gruppi elettrogeni e impianti fotovoltaici.

L'azienda ha progettato un impianto microidroelettrico essenzialmente composto da:

- A. Turbina idraulica;
- B. Generatore asincrono;
- C. Quadro elettrico BT e automazione;
- D. Collegamenti elettrici e impianto di messa a terra.

TURBINA IDRAULICA

La turbina è essenzialmente composta da:

- **Girante Pelton in acciaio Inox AISI 316L:** le pale sono ottenute per microfusione a cera persa per cui si ha un'elevata precisione ed un buon grado di finitura. Le pale vengono fissate al discomozzo mediante saldatura a TIG senza apporto di materiale.
La ruota è equilibrata dinamicamente. L'accoppiamento diretto della girante sull'albero generatore avviene mediante un mozzo a pinza conica opportunamente dimensionato. Il mozzo a pinza conica garantisce una notevole solidità di accoppiamento all'albero ed un sicuro e semplice smontaggio anche dopo anni di fissaggio. Anche il mozzo a pinza è completamente in acciaio inox AISI 316L;
- **Cassa turbina in acciaio Inox AISI 304:** la cassa turbina è costituita da un composto saldato in lamiera di acciaio di adeguato spessore. La parte superiore del cilindro interno, le due flange ed il cilindro esterno formano il distributore, ossia la camera di adduzione dell'acqua in pressione ai 6 bocchelli. Il cilindro interno ha pure la funzione di raccogliere e convogliare l'acqua nel pozzetto di scarico ed inoltre fissa e sostiene il gruppo turbina-generatore mediante piedini saldati sulla superficie esterna del cilindro stesso e che



appoggeranno sull'anello di base. Sulla flangia superiore del distributore sono fissati gli attuatori elettrici che azionano le valvole a sfera di intercettazione degli getti. I getti sono in Mylon o acciaio inox AISI304 con i fori dimensionati per la portata di progetto. Sono facilmente sostituibili per qualsiasi esigenza gestionale. Il Mylon è un materiale plastico con cariche di fibre di vetro con caratteristiche di alta resistenza e lunga durata. Sulla fascia esterna del distributore sono fissati ed adeguatamente protetti i cavi di collegamento agli attuatori elettrici che confluiscono in un'apposita cassetta di derivazione;

- **Anello base in acciaio Inox AISI 304:** L'anello di base è il punto di appoggio del gruppo turbina-generatore al basamento e semplifica l'installazione del gruppo consentendone il posizionamento senza la necessità di installare il gruppo stesso al momento della costruzione della cabina. L'anello di base può essere fornito con il gruppo o precedentemente in fase di costruzione del basamento. Tra l'anello base e lo scarico della turbina sarà inserito un'apposita guarnizione di tenuta per evitare la contaminazione dell'acqua scaricata dalla turbina;
- **Attuatori elettrici:** Sono sistemi che azionano le valvole sui diversi getti imprimendo una rotazione di 90° per il posizionamento ON/OFF delle valvole stesse. Sull'attuatore è predisposto un box con i fincorsa elettrici utilizzabili nelle logiche di comando. Il motore di comando è alimentato in corrente continua a 24V. Rispetto ad altre soluzioni di movimentazione il sistema in corrente continua presenta diversi vantaggi rispetto ad altre fonti di energia ausiliaria (aria o olio) con relativi sistemi di messa in pressione:
 - Ridotto consumo di energia per la movimentazione mancando compressori o centraline oleodinamiche;
 - Nessun rischio di inquinamento;
 - Azionamenti a velocità costante;
 - Sicurezza di intervento;
 - Semplicità impiantistica e di installazione e manutenzione;

L'arresto del gruppo avviene con la chiusura degli attuatori sui 6 getti.

<i>H_b</i> [m]	<i>H_n</i> [m]	<i>N</i> [rpm]	<i>P_t</i> [kW]	<i>Q</i> [l/s]
101	100	1500	30	30

Tabella 4.13 – Dati tecnici della turbina



Dove:

Q è la portata massima;

H_b è il salto lordo;

H_n è il salto netto;

N sono i giri;

P_t potenza turbina;

GENERATORE ASINCRONO

Per il generatore asincrono si utilizza un motore asincrono opportunamente dimensionato. Ai piedini del generatore è fissata un'apposita staffa che ne facilita il sollevamento. E' previsto un ulteriore trattamento per ambienti umidi, per gli avvolgimenti e per la vernice esterna. Sulla flangia del generatore è montata un'apposita parabola che ne impedisce il contatto con l'acqua. I cuscinetti sono ampiamente dimensionati e possono quindi sopportare agevolmente il carico assiale della girante. Il loro ingrassaggio è a vita per cui non sono richieste lubrificazioni periodiche. Un adeguato schermo o corteco evita la fuoriuscita del grasso dal cuscinetto stesso. Sulla parte superiore del generatore è montato il sensore di giri raccordato tramite un connettore esterno stagno. Per ridurre le vibrazioni e gli sforzi sui cuscinetti il rotore viene equilibrato dinamicamente con un grado di equilibratura di livello ridotto. Una migliore equilibratura garantisce una maggior durata dei cuscinetti e ne riduce le sollecitazioni in caso di sovravelocità.

CARATTERISTICHE TECNICHE

tensione	400	V
velocità nominale	1500	rpm
velocità di fuga	2	Vn
numero poli	4	
potenza nominale	30	kW
classe di sovratemperatura/isolamento	F/B	
grado di protezione	IP23	
forma costruttiva in accordo alla IEC 34-7	V1	

Tabella 4.14 – Caratteristiche tecniche generatore asincrono

APPARECCHIATURE E VALVOLE

- N. 1 Valvola di guardia della turbina, del tipo a saracinesca con corpo piatto e cuneo gommato, comando manuale. Costruita con le seguenti caratteristiche: diametro nominale DN125 pressione di costruzione PN 16
- Tronchetto di smontaggio.
- N. 1 Tubazione in acciaio saldato di collegamento fra la valvola di macchina ed il distributore.



QUADRO ELETTRICO BT E AUTOMAZIONE

Quadro generale di comando-controllo e protezione, dalle seguenti caratteristiche:

- tipo protetto, ad armadio, da posare a pavimento;
- costruzione robusta in lamiera ribordata (sp. 18/20/10) e profilati in acciaio;
- costituito da più pannelli ognuno ispezionabile dal fronte; anteriormente sarà provvisto di porte incernierate munite di maniglia con serratura a chiave - accuratamente verniciato con vernici epossidiche previo severo trattamento antiruggine;
- verniciatura: RAL 7030 o 7032. - Corredato di opportune feritoie di areazione, di golfari di sollevamento e diaframmi interni tra i vari scomparti;
- Connessioni interne di potenza in sbarre di rame elettrolitico e treccia isolata di sezioni abbondantemente adeguate e connessioni ausiliarie in cavo tipo NO7V-K;
- Esecuzione conforme alle Norme CEI 17-13/1, 64-8 e DPR 574/55;
- Marcatura CE Caratteristiche elettriche principali - tensione di esercizio principale 400 V – 50 Hz - tensione di esercizio circuiti aux 230 V – 24 Hz
- tensione di prova a frequenza industriale per 1 minuto: 2,5 KV circuiti principali 1,5 KV circuiti ausiliari

COLLEGAMENTI ELETTRICI

Cavi di bassa tensione con conduttori a corda flessibile di rame ricotto, isolati con gomma etilenpropilenica ad alto modulo G7 sotto guaina di PVC, non propaganti l'incendio e a ridotta emissione di gas corrosivi, a norme CEI 20-13, 20-22, 20-37, per i seguenti collegamenti:

- dal quadro BT al generatore;
- dal quadro di BT ai vari dispositivi ausiliari in campo.

Detti cavi verranno alloggiati all'interno di canali o guaine metallici idonei alla protezione meccanica degli stessi, completi dei necessari accessori di posa. Saranno inoltre compresi i vari conduttori di protezione ed equipotenziali per il collegamento delle varie masse elettriche all'impianto di messa a terra. L'impianto di messa a terra che verrà realizzata sarà del tipo TN-S, quindi con il collegamento delle varie masse elettriche e del neutro del trasformatore ed un unico collettore di terra e ad un unico sistema di dispersione. Il sistema di dispersione verrà realizzato mediante la posa di dispersori verticali e orizzontali nel terreno, costituiti da profilati in acciaio zincato e corda in rame nudo, dimensionati secondo le norme CEI 11-1 e coordinati con i valori comunicati dal distributore di energia elettrica.

4.6 SCENARI DI UTILIZZO¹⁶

Bankondji si trova negli altopiani occidentali, a sud del grande altopiano di Bamileke. Il paesaggio è costituito da colline, bassi altopiani e la pianura vulcano-alluvionale nel quartiere di Kouma. I fiumi principali son Tchomedjieu, ShiNku, Shinkok con le cascate di Hounkok, Nsiaisa.

La microcentrale idroelettrica è realizzata sul versante destro della valle di Nshi Lapor un piccolo corso d'acqua che ha una portata minima di 10 l/s e una portata massima di 100 l/s. Non è stato possibile ottenere la curva di durata delle portate ma sono state effettuate delle misurazioni delle portate nel bacino di sedimentazione. Le misurazioni non sono state effettuate giornalmente ma la portata minima misurata alla fine della stagione secca è stata di 22 l/s invece la portata nella stagione delle piogge è largamente superiore fino a raggiungere i 30 l/s.

È stata ipotizzata la curva di durata della portata, basandosi sulle informazioni riguardanti le misurazioni dirette di portata:

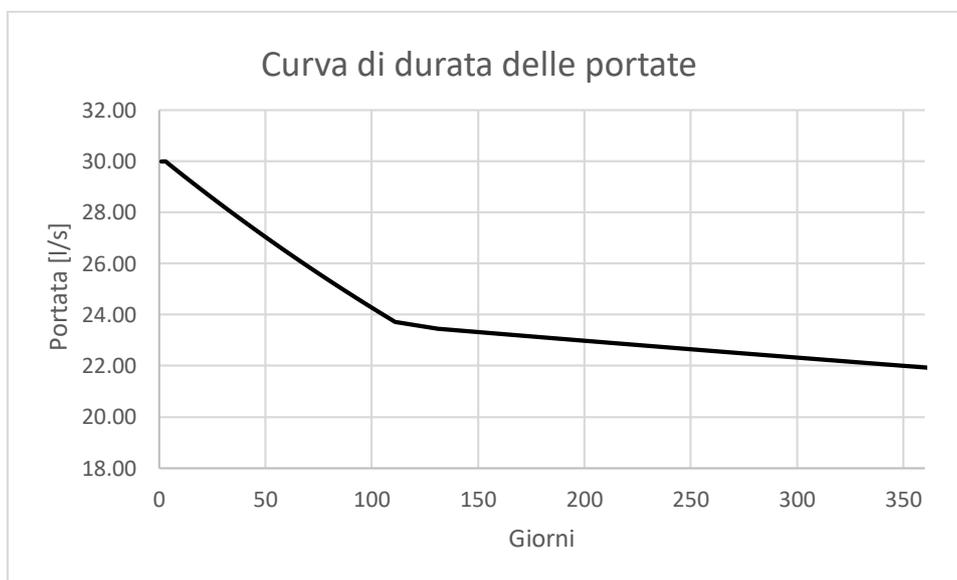


Figura 4.41 – Curva di durata delle portate

Per il calcolo della produzione dell'energia idroelettrica, è necessario calcolare il carico turbinabile ΔH (m) che è stato calcolato sottraendo al salto di 101 metri le perdite di carico distribuite e localizzate.

¹⁶ Calcoli riportati in Appendice A



Dopo aver ricavato il carico turbinabile, è possibile confrontare l'energia che potenzialmente si potrebbe produrre con quella prodotta dalla turbina proposta.

La potenza idraulica disponibile, cioè la potenza teorica che sarebbe fornita da un impianto idraulico senza perdite, è la seguente:

$$P = \gamma \cdot \Delta H \cdot Q_i$$

Dove:

γ è il peso specifico dell'acqua [kN/m³];

ΔH è il salto lordo massimo [m];

Q_i è la portata disponibile [m³/s]

Nota la potenza che potresti produrre P , è stata calcolata l'energia in kWh che si può potenzialmente produrre:

$$E = P \cdot 24h$$

Se la portata turbinabile è maggiore della portata minima di targa (posta pari a 0.02 m³/s) allora il rendimento della macchina è massimo (posto pari a 0.8):

$$\text{Se } Q_t > Q_{min} \rightarrow \eta = \eta_{max}$$

In caso contrario:

$$\eta = \eta_{max} \cdot \frac{Q_t}{Q_{min}}$$

Dove:

Q_t è la portata turbinabile [m³/s];

Nota la portata turbinabile è l'efficienza della macchina, è stata calcolata la potenza prodotta dalla macchina:

$$P_{mecc} = \gamma \cdot \Delta H \cdot Q_t \cdot \eta$$

Come per la potenza idraulica disponibile, è possibile calcolare l'energia prodotta (kWh):

$$E_{mecc} = P_{mecc} \cdot 24h$$



L'impianto alimenta le due pompe quando l'energia prodotta dai sistemi fotovoltaici non è sufficiente. Nelle tabelle seguenti (tab. 4.16 e 4.17) sono riportati i consumi delle due pompe sommerse rispettivamente del pozzo e della sorgente:

Mese	Energia massimo giornaliero consumato dalla pompa dalle 8:00 alle 16:00 in [kWh]	Numero di giorni considerati al mese	Energia massima consumata dalla pompa ogni mese [kWh]	Energia massima prodotta da fotovoltaico ogni mese [kWh]
Gennaio	28	31	781.2	1563.181
Febbraio	28	28	705.6	1398.751
Marzo	28	31	781.2	1246.014
Aprile	28	30	756	1052.352
Maggio	28	31	781.2	1019.466
Giugno	28	30	756	876.96
Luglio	28	31	781.2	838.2276
Agosto	28	31	781.2	815.5728
Settembre	28	30	756	898.884
Ottobre	28	31	781.2	1019.466
Novembre	28	30	756	1227.744
Dicembre	28	31	781.2	1472.562

Tabella 4.15 – Consumi pompa Berntz Lorentz PS 4000 C-SJ5-25

Mese	Energia massimo giornaliero consumato dalla pompa dalle 8:00 alle 16:00 in [kWh]	Numero di giorni considerati al mese	Energia massima consumata dalla pompa ogni mese [kWh]	Energia massima prodotta da fotovoltaico ogni mese [kWh]
Gennaio	24	31	930	2012.371
Febbraio	24	28	840	1800.691
Marzo	24	31	930	1604.064
Aprile	24	30	900	1354.752
Maggio	24	31	930	1312.416
Giugno	24	30	900	1128.96
Luglio	24	31	930	1079.98
Agosto	24	31	930	1049.933
Settembre	24	30	900	1157.184
Ottobre	24	31	930	1312.416
Novembre	24	31	930	1580.544
Dicembre	24	28	840	1895.712

Tabella 4.16 – Consumo elettropompa sommergibile Vicountétipo: 4SD6 / 20



L'energia massima prodotta anche durante i periodi di pioggia (da metà marzo a metà novembre) è consistente perché durante questo periodo il sole è comunque presente dalle ore 9 di mattina alle ore 15 di pomeriggio.

Dalle tabelle si deduce che il massimo consumo delle due pompe è soddisfatto dall'energia prodotta dal fotovoltaico, tuttavia è riportata l'energia massima prodotta che potrebbe variare in base alle condizioni meteorologiche ed inoltre nell'impianto di approvvigionamento ci sono ulteriori dispositivi che necessitano di elettricità. Nel caso di insufficiente energia prodotta dal fotovoltaico subentra l'energia prodotta dall'impianto idroelettrico.

L'energia prodotta dal micro-idroelettrico potrebbe anche soddisfare in parte il fabbisogno di elettricità della località di Bankondji. La domanda di energia elettrica si basa sul numero di abitanti e sulle loro attività. Nel paragrafo 2.1 è riportato il sondaggio demografico svolto nel 2013 dal quale risulta una popolazione di 3500 abitanti. Ipotizzando una crescita lineare della popolazione di Bankondji con un tasso di crescita del 15% ogni 10 anni è stata ricavata la popolazione attuale a Bankondji: $P_{2021}=3780$ abitanti.

$$P_{0+1} = P_0 + P_0 \cdot r$$

Dove

P_0 è la popolazione all'anno 0 quindi 2013;

P_{0+1} è la popolazione all'anno successivo;

r è il tasso di crescita annuo.

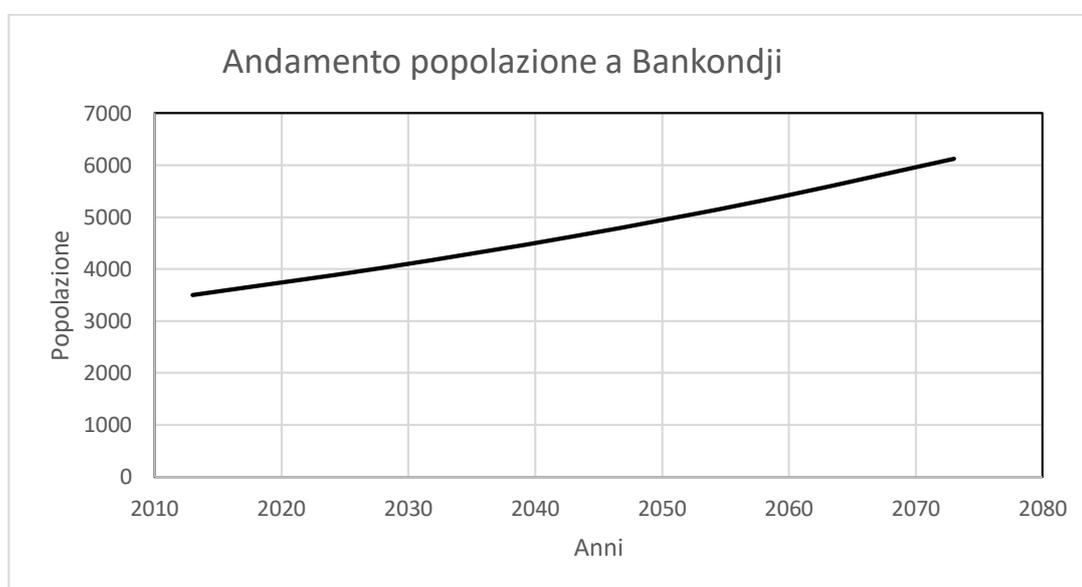


Figura 4.42 – Crescita lineare della popolazione di Bankondji



Ipotizzando una durata di progetto di 50 anni, è stata calcolata la richiesta di elettricità della popolazione nel 2071:

$$B_n = B_m \cdot P_0 \cdot (1 + \alpha)^n = 1838256 \text{ kWh}$$

Dove

B_n è il fabbisogno futuro della popolazione in energia elettrica;

n è la durata del progetto;

B_m è il fabbisogno energetico per ogni abitante in Camerun (231 kWh);

α è il tasso di crescita annuo della popolazione.

Dalla tabella 4.10 è stata ricavata l'energia totale prodotta in un anno:

$$E_{tot} = \gamma \cdot Q_{media} \cdot H_{medio} \cdot \frac{h}{anno} \cdot \eta = 9.81 \cdot 0.024 \cdot 100.84 \cdot 8280 \cdot 0.75 = 147436.4 \text{ kWh}$$

Dove:

Q_{media} è la portata media annua [m^3/s];

H_{medio} è il salto medio [m];

$\frac{h}{anno}$ sono le ore di funzionamento annue considerando un fermo impianto di 20 giorni [8280 ore]

η è il rendimento;

Confrontandola con il fabbisogno energetico, è stato dimostrato che soddisferebbe solamente l'8% del totale.



5. ANALISI DEI COSTI DELL'IMPIANTO

Per effettuare un'analisi economica è necessario un progetto preliminare degli elementi componenti l'impianto. Questi prezzi non sono da considerarsi definitivi fin quando non sono definite le specifiche tecniche e i tempi di consegna in un capitolato d'appalto.

Il costo del recupero dell'impianto idroelettrico a Bankondji in Camerun è dato dal costo della turbina, dallo smantellamento e realizzazione della nuova condotta forzata. Il produttore Tschurtschenthaler Turbinenbau ha proposto una turbina Pelton a 1 getto e ad asse orizzontale accoppiata ad un generatore asincrono della potenza di 22 kW con 1000 giri/min. La cassa della turbina è in acciaio 1.4313 (spessore 10-20mm), la girante fabbricata sempre con lo stesso tipo di acciaio monoblocco, equilibrata dinamicamente e montata con un mozzo sull'albero del generatore. Il costo della turbina è all'incirca 45000 euro e 25000 euro di impianto elettrico.

L'azienda MISA ha progettato un impianto microidroelettrico descritto nel paragrafo 4.5. La stima economica della fornitura con posa in opera è la seguente:

Descrizione	Q.tà	Importo tot (IVA inclusa)
Gruppo turbina con generatore asincrono da 30 kW completo di apparecchiature idrauliche, quadristica e ed impiantistica elettrica	1	340 000.00

Tabella 5.1 – Costo impianto idroelettrico –Fonte: Misa

Nel paragrafo relativo ai possibili interventi sulla condotta forzata è stata consigliata una condotta forzata in PE 100 - SDR 11 - PN 16 avente un diametro esterno di 280 mm. Il costo complessivo della condotta è stato calcolato basandosi sul sito Diffusione Industriale che propone diverse soluzioni per l'industria:

Descrizione	Costo € (IVA esclusa)
Costo tubo in PE100 -SDR11-PN16 avente un diametro esterno di 280mm e una lunghezza di 6 m	807.23
Costo complessivo condotta considerando una lunghezza di 250 metri	201807.5
Costo manicotti elettrosaldabili	4410
Totale	207 024.73

Tabella 5.2 – Costo condotta forzata



La costruzione di due condotte forzate in parallelo è stata scartata a causa delle ingenti perdite di carico.

Per evitare opere di scavo e demolizione, si è pensato anche al rivestimento della condotta per riparare e risanare la condotta forzata. A tale proposito è stato richiesto un preventivo da IMEC, un'azienda che si occupa di risanamento relining. L'offerta economica è la seguente:

Descrizione	Costo € (IVA di legge esclusa)
Intervento comprensivo di trasferta da Italia a Camerun di operatori e attrezzature (non comprensivo di IVA di legge)	185 000.00
Intervento di risanamento interno non distruttivo mediante sistema relining (calza impregnata di resina) fino a 250 mt compresa video ispezione iniziale e finale con rilascio documentazione digitale	350
Intervento di risanamento con anelli alle estremità della tubazione: sigillatura con specifici giunti meccanici in gomma/acciaio appositamente creati per sigillare perfettamente ogni tipo di giunzione all' interno di tubazione o pozzetti	37200
Totale	222 550.00

Tabella 5.3 – Costo di relining

Confrontando i costi dei due interventi sulla condotta forzata, si sceglierebbe la progettazione di una nuova condotta forzata in PE. Tuttavia nella stima economica non è stato considerato il costo dello smantellamento della tubazione e il costo del trasporto del materiale che potrebbe pesare sul costo complessivo dell'intervento.

Ipotizzando l'installazione della turbina Pelton proposta dall'azienda Misa e il risanamento della condotta forzata, il costo totale delle opere è il seguente:

Descrizione	Costo € (IVA di legge esclusa)
Intervento comprensivo di trasferta da Italia a Camerun di operatori e attrezzature (non comprensivo di IVA di legge)	185 000.00
Intervento di risanamento interno non distruttivo mediante sistema relining (calza impregnata di resina) fino a 250 mt compresa video ispezione iniziale e finale con rilascio documentazione digitale	350
Intervento di risanamento con anelli alle estremità della tubazione: sigillatura con specifici giunti meccanici in gomma/acciaio appositamente creati per sigillare perfettamente ogni tipo di giunzione all'interno di tubazione o pozzetti	37200
Gruppo turbina con generatore asincrono da 30 kW completo di apparecchiature idrauliche, quadristica e ed impiantistica elettrica	340 000.00
Totale	562 550.00

Tabella 5.4 –Costo complessivo opere



Nel costo totale non è compreso il costo del trasporto della macchina in Camerun che non è possibile stimare.

Facendo dei semplici calcoli è possibile calcolare quanti anni saranno necessari affinché la spesa per il risanamento sia ammortizzata dal guadagno dell'impianto, ipotizzando che l'energia prodotta dal fotovoltaico sia sufficiente ad alimentare le apparecchiature idrauliche dell'impianto di approvvigionamento.

Descrizione	Costo €
Costo kWh in Camerun	0.14
Guadagno considerando che l'energia totale annua è di 147436.4 kWh	20 641.1
Spese di manutenzione impianto annue (ipotesi)	2000
Guadagno netto	18 641.1

Tabella 5.5 – Guadagno netto ricavato dal microidroelettrico

Confrontando la tabella 5.4 e 5.5, è stato ricavato il tempo necessario per ammortizzare l'intero costo: 30 anni.



CONCLUSIONE

L'obiettivo principale dell'elaborato di tesi è stato cercare una soluzione alle problematiche idriche che affliggono la località di Bankondji.

Arcs in partenariato con l'associazione locale Codebank 2000 ha ampliato e risanato un impianto di approvvigionamento idrico in questa zona rurale del Camerun. Tuttavia c'è stato un problema di uso e manutenzione di tutte le apparecchiature, legato soprattutto alle difficoltà finanziarie del comitato che fatica a riscuotere e quindi a pagare regolarmente i manutentori.

La problematica affrontata in questo elaborato di tesi è l'inadeguatezza del micro-idroelettrico che comporta la mancanza di elettricità necessaria all'elettropompe sommerse e ulteriori apparecchi elettrici, durante il periodo delle piogge. Le problematiche principali dell'impianto sono le ingenti perdite della condotta forzata e l'errato modello della turbina.

Le soluzioni proposte riguardanti la condotta forzata, sono state una progettazione ex novo e il risanamento della condotta forzata preesistente con un rivestimento interno (relining). Con la disponibilità di alcuni produttori è stato analizzato anche il loro peso economico. In caso di progettazione non è stato possibile definire il costo della manodopera e del trasporto del materiale necessario e quindi non è stato possibile confrontare appieno le due spese economiche.

Per porre rimedio all'inadeguatezza della turbina, due produttori (Tschurtschenthaler turbinenbau e Misa) hanno partecipato al mio progetto di tesi, proponendo un modello specifico di macchina e stimando il valore economico. Anche in questo caso, gran parte della spesa è legata al trasporto del macchinario in Camerun e alla sua installazione che non è possibile stimare con esattezza.

In questo elaborato è stata affrontata una parte delle problematiche da risolvere a Bankondji. L'impianto necessita di altri interventi riguardanti la sostituzione di apparecchiature usate dell'impianto di approvvigionamento e realizzazione di una linea elettrica affinché l'elettricità in eccesso prodotta dal fotovoltaico e dall'impianto idroelettrico possa soddisfare la domanda di elettricità della popolazione o almeno di servizi pubblici come ospedali e scuole.



APPENDICE A

<i>giorni</i>	<i>Q</i> [l/s]	<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>Δh</i> [m]	<i>H_n</i> [m]	<i>η</i>	<i>P_k</i> [W]	<i>P_k</i> [kW]	<i>E</i> [kWh]	<i>P_{mecc}</i> [kW]	<i>E_{mecc}</i> [kWh]
1	30.00	0.030	0.250	100.75	0.75	29651	29.65	711.6	22.24	533.71
2	30.00	0.030	0.250	100.75	0.75	29651	29.65	711.6	22.24	533.71
3	30.00	0.030	0.250	100.75	0.75	29651	29.65	711.6	22.24	533.71
4	29.93	0.030	0.249	100.75	0.75	29585	29.58	710.0	22.19	532.53
5	29.87	0.030	0.248	100.75	0.75	29519	29.52	708.5	22.14	531.35
6	29.80	0.030	0.246	100.75	0.75	29454	29.45	706.9	22.09	530.17
7	29.73	0.030	0.245	100.75	0.75	29388	29.39	705.3	22.04	528.99
8	29.67	0.030	0.244	100.76	0.75	29323	29.32	703.8	21.99	527.82
9	29.60	0.030	0.243	100.76	0.75	29258	29.26	702.2	21.94	526.65
10	29.53	0.030	0.242	100.76	0.75	29193	29.19	700.6	21.90	525.48
11	29.47	0.029	0.241	100.76	0.75	29129	29.13	699.1	21.85	524.32
12	29.40	0.029	0.240	100.76	0.75	29064	29.06	697.5	21.80	523.16
13	29.34	0.029	0.239	100.76	0.75	29000	29.00	696.0	21.75	522.00
14	29.27	0.029	0.238	100.76	0.75	28936	28.94	694.5	21.70	520.84
15	29.21	0.029	0.237	100.76	0.75	28872	28.87	692.9	21.65	519.69
16	29.14	0.029	0.236	100.76	0.75	28808	28.81	691.4	21.61	518.54
17	29.08	0.029	0.235	100.77	0.75	28744	28.74	689.9	21.56	517.40
18	29.01	0.029	0.234	100.77	0.75	28681	28.68	688.3	21.51	516.26
19	28.95	0.029	0.233	100.77	0.75	28618	28.62	686.8	21.46	515.12
20	28.89	0.029	0.232	100.77	0.75	28554	28.55	685.3	21.42	513.98
21	28.82	0.029	0.231	100.77	0.75	28492	28.49	683.8	21.37	512.85
22	28.76	0.029	0.230	100.77	0.75	28429	28.43	682.3	21.32	511.72
23	28.69	0.029	0.229	100.77	0.75	28366	28.37	680.8	21.27	510.59
24	28.63	0.029	0.228	100.77	0.75	28304	28.30	679.3	21.23	509.47
25	28.57	0.029	0.227	100.77	0.75	28241	28.24	677.8	21.18	508.34
26	28.50	0.029	0.226	100.77	0.75	28179	28.18	676.3	21.13	507.23
27	28.44	0.028	0.225	100.78	0.75	28117	28.12	674.8	21.09	506.11
28	28.38	0.028	0.224	100.78	0.75	28055	28.06	673.3	21.04	505.00
29	28.32	0.028	0.223	100.78	0.75	27994	27.99	671.9	21.00	503.89
30	28.25	0.028	0.222	100.78	0.75	27932	27.93	670.4	20.95	502.78
31	28.19	0.028	0.221	100.78	0.75	27871	27.87	668.9	20.90	501.68
32	28.13	0.028	0.220	100.78	0.75	27810	27.81	667.4	20.86	500.58
33	28.07	0.028	0.219	100.78	0.75	27749	27.75	666.0	20.81	499.48
34	28.01	0.028	0.218	100.78	0.75	27688	27.69	664.5	20.77	498.38
35	27.94	0.028	0.217	100.78	0.75	27627	27.63	663.1	20.72	497.29



36	27.88	0.028	0.216	100.78	0.75	27567	27.57	661.6	20.68	496.20
37	27.82	0.028	0.215	100.79	0.75	27507	27.51	660.2	20.63	495.12
38	27.76	0.028	0.214	100.79	0.75	27446	27.45	658.7	20.58	494.03
39	27.70	0.028	0.213	100.79	0.75	27386	27.39	657.3	20.54	492.95
40	27.64	0.028	0.212	100.79	0.75	27326	27.33	655.8	20.49	491.88
41	27.58	0.028	0.211	100.79	0.75	27267	27.27	654.4	20.45	490.80
42	27.52	0.028	0.210	100.79	0.75	27207	27.21	653.0	20.41	489.73
43	27.46	0.027	0.209	100.79	0.75	27148	27.15	651.5	20.36	488.66
44	27.40	0.027	0.208	100.79	0.75	27089	27.09	650.1	20.32	487.59
45	27.34	0.027	0.207	100.79	0.75	27030	27.03	648.7	20.27	486.53
46	27.28	0.027	0.207	100.79	0.75	26971	26.97	647.3	20.23	485.47
47	27.22	0.027	0.206	100.79	0.75	26912	26.91	645.9	20.18	484.41
48	27.16	0.027	0.205	100.80	0.75	26853	26.85	644.5	20.14	483.36
49	27.10	0.027	0.204	100.80	0.75	26795	26.79	643.1	20.10	482.31
50	27.04	0.027	0.203	100.80	0.75	26736	26.74	641.7	20.05	481.26
51	26.98	0.027	0.202	100.80	0.75	26678	26.68	640.3	20.01	480.21
52	26.92	0.027	0.201	100.80	0.75	26620	26.62	638.9	19.97	479.17
53	26.86	0.027	0.200	100.80	0.75	26562	26.56	637.5	19.92	478.12
54	26.80	0.027	0.199	100.80	0.75	26505	26.50	636.1	19.88	477.09
55	26.75	0.027	0.199	100.80	0.75	26447	26.45	634.7	19.84	476.05
56	26.69	0.027	0.198	100.80	0.75	26390	26.39	633.4	19.79	475.02
57	26.63	0.027	0.197	100.80	0.75	26333	26.33	632.0	19.75	473.99
58	26.57	0.027	0.196	100.80	0.75	26276	26.28	630.6	19.71	472.96
59	26.51	0.027	0.195	100.80	0.75	26219	26.22	629.2	19.66	471.94
60	26.46	0.026	0.194	100.81	0.75	26162	26.16	627.9	19.62	470.91
61	26.40	0.026	0.193	100.81	0.75	26105	26.11	626.5	19.58	469.90
62	26.34	0.026	0.193	100.81	0.75	26049	26.05	625.2	19.54	468.88
63	26.28	0.026	0.192	100.81	0.75	25993	25.99	623.8	19.49	467.87
64	26.23	0.026	0.191	100.81	0.75	25936	25.94	622.5	19.45	466.85
65	26.17	0.026	0.190	100.81	0.75	25880	25.88	621.1	19.41	465.85
66	26.11	0.026	0.189	100.81	0.75	25824	25.82	619.8	19.37	464.84
67	26.06	0.026	0.188	100.81	0.75	25769	25.77	618.4	19.33	463.84
68	26.00	0.026	0.188	100.81	0.75	25713	25.71	617.1	19.28	462.84
69	25.94	0.026	0.187	100.81	0.75	25658	25.66	615.8	19.24	461.84
70	25.89	0.026	0.186	100.81	0.75	25602	25.60	614.5	19.20	460.84
71	25.83	0.026	0.185	100.81	0.75	25547	25.55	613.1	19.16	459.85
72	25.78	0.026	0.184	100.82	0.75	25492	25.49	611.8	19.12	458.86
73	25.72	0.026	0.184	100.82	0.75	25437	25.44	610.5	19.08	457.87
74	25.66	0.026	0.183	100.82	0.75	25383	25.38	609.2	19.04	456.89



75	25.61	0.026	0.182	100.82	0.75	25328	25.33	607.9	19.00	455.91
76	25.55	0.026	0.181	100.82	0.75	25274	25.27	606.6	18.96	454.93
77	25.50	0.025	0.180	100.82	0.75	25220	25.22	605.3	18.91	453.95
78	25.44	0.025	0.180	100.82	0.75	25165	25.17	604.0	18.87	452.98
79	25.39	0.025	0.179	100.82	0.75	25111	25.11	602.7	18.83	452.01
80	25.33	0.025	0.178	100.82	0.75	25058	25.06	601.4	18.79	451.04
81	25.28	0.025	0.177	100.82	0.75	25004	25.00	600.1	18.75	450.07
82	25.23	0.025	0.177	100.82	0.75	24950	24.95	598.8	18.71	449.11
83	25.17	0.025	0.176	100.82	0.75	24897	24.90	597.5	18.67	448.15
84	25.12	0.025	0.175	100.82	0.75	24844	24.84	596.3	18.63	447.19
85	25.06	0.025	0.174	100.83	0.75	24791	24.79	595.0	18.59	446.23
86	25.01	0.025	0.174	100.83	0.75	24738	24.74	593.7	18.55	445.28
87	24.96	0.025	0.173	100.83	0.75	24685	24.68	592.4	18.51	444.33
88	24.90	0.025	0.172	100.83	0.75	24632	24.63	591.2	18.47	443.38
89	24.85	0.025	0.171	100.83	0.75	24580	24.58	589.9	18.43	442.43
90	24.80	0.025	0.171	100.83	0.75	24527	24.53	588.7	18.40	441.49
91	24.74	0.025	0.170	100.83	0.75	24475	24.47	587.4	18.36	440.55
92	24.69	0.025	0.169	100.83	0.75	24423	24.42	586.1	18.32	439.61
93	24.64	0.025	0.168	100.83	0.75	24371	24.37	584.9	18.28	438.67
94	24.59	0.025	0.168	100.83	0.75	24319	24.32	583.7	18.24	437.74
95	24.53	0.025	0.167	100.83	0.75	24267	24.27	582.4	18.20	436.81
96	24.48	0.024	0.166	100.83	0.75	24216	24.22	581.2	18.16	435.88
97	24.43	0.024	0.166	100.83	0.75	24164	24.16	579.9	18.12	434.95
98	24.38	0.024	0.165	100.84	0.75	24113	24.11	578.7	18.08	434.03
99	24.32	0.024	0.164	100.84	0.75	24062	24.06	577.5	18.05	433.11
100	24.27	0.024	0.164	100.84	0.75	24011	24.01	576.3	18.01	432.19
101	24.22	0.024	0.163	100.84	0.75	23960	23.96	575.0	17.97	431.27
102	24.17	0.024	0.162	100.84	0.75	23909	23.91	573.8	17.93	430.36
103	24.12	0.024	0.161	100.84	0.75	23858	23.86	572.6	17.89	429.45
104	24.07	0.024	0.161	100.84	0.75	23808	23.81	571.4	17.86	428.54
105	24.02	0.024	0.160	100.84	0.75	23757	23.76	570.2	17.82	427.63
106	23.96	0.024	0.159	100.84	0.75	23707	23.71	569.0	17.78	426.73
107	23.91	0.024	0.159	100.84	0.75	23657	23.66	567.8	17.74	425.83
108	23.86	0.024	0.158	100.84	0.75	23607	23.61	566.6	17.71	424.93
109	23.81	0.024	0.157	100.84	0.75	23557	23.56	565.4	17.67	424.03
110	23.76	0.024	0.157	100.84	0.75	23508	23.51	564.2	17.63	423.14
111	23.71	0.024	0.156	100.84	0.75	23458	23.46	563.0	17.59	422.24
112	23.70	0.024	0.156	100.84	0.75	23445	23.44	562.7	17.58	422.01
113	23.69	0.024	0.156	100.84	0.75	23432	23.43	562.4	17.57	421.77



114	23.67	0.024	0.156	100.84	0.75	23418	23.42	562.0	17.56	421.53
115	23.66	0.024	0.155	100.84	0.75	23405	23.41	561.7	17.55	421.30
116	23.65	0.024	0.155	100.84	0.75	23392	23.39	561.4	17.54	421.06
117	23.63	0.024	0.155	100.84	0.75	23379	23.38	561.1	17.53	420.82
118	23.62	0.024	0.155	100.85	0.75	23366	23.37	560.8	17.52	420.58
119	23.61	0.024	0.155	100.85	0.75	23353	23.35	560.5	17.51	420.35
120	23.59	0.024	0.154	100.85	0.75	23340	23.34	560.1	17.50	420.11
121	23.58	0.024	0.154	100.85	0.75	23326	23.33	559.8	17.49	419.88
122	23.57	0.024	0.154	100.85	0.75	23313	23.31	559.5	17.49	419.64
123	23.55	0.024	0.154	100.85	0.75	23300	23.30	559.2	17.48	419.40
124	23.54	0.024	0.154	100.85	0.75	23287	23.29	558.9	17.47	419.17
125	23.53	0.024	0.154	100.85	0.75	23274	23.27	558.6	17.46	418.93
126	23.51	0.024	0.153	100.85	0.75	23261	23.26	558.3	17.45	418.70
127	23.50	0.023	0.153	100.85	0.75	23248	23.25	558.0	17.44	418.46
128	23.49	0.023	0.153	100.85	0.75	23235	23.23	557.6	17.43	418.23
129	23.47	0.023	0.153	100.85	0.75	23222	23.22	557.3	17.42	417.99
130	23.46	0.023	0.153	100.85	0.75	23209	23.21	557.0	17.41	417.76
131	23.45	0.023	0.153	100.85	0.75	23196	23.20	556.7	17.40	417.53
132	23.44	0.023	0.152	100.85	0.75	23189	23.19	556.5	17.39	417.40
133	23.43	0.023	0.152	100.85	0.75	23182	23.18	556.4	17.39	417.28
134	23.43	0.023	0.152	100.85	0.75	23175	23.18	556.2	17.38	417.16
135	23.42	0.023	0.152	100.85	0.75	23169	23.17	556.0	17.38	417.04
136	23.41	0.023	0.152	100.85	0.75	23162	23.16	555.9	17.37	416.91
137	23.41	0.023	0.152	100.85	0.75	23155	23.16	555.7	17.37	416.79
138	23.40	0.023	0.152	100.85	0.75	23148	23.15	555.6	17.36	416.67
139	23.39	0.023	0.152	100.85	0.75	23141	23.14	555.4	17.36	416.55
140	23.38	0.023	0.152	100.85	0.75	23135	23.13	555.2	17.35	416.42
141	23.38	0.023	0.152	100.85	0.75	23128	23.13	555.1	17.35	416.30
142	23.37	0.023	0.152	100.85	0.75	23121	23.12	554.9	17.34	416.18
143	23.36	0.023	0.152	100.85	0.75	23114	23.11	554.7	17.34	416.06
144	23.36	0.023	0.151	100.85	0.75	23108	23.11	554.6	17.33	415.94
145	23.35	0.023	0.151	100.85	0.75	23101	23.10	554.4	17.33	415.81
146	23.34	0.023	0.151	100.85	0.75	23094	23.09	554.3	17.32	415.69
147	23.34	0.023	0.151	100.85	0.75	23087	23.09	554.1	17.32	415.57
148	23.33	0.023	0.151	100.85	0.75	23080	23.08	553.9	17.31	415.45
149	23.32	0.023	0.151	100.85	0.75	23074	23.07	553.8	17.31	415.33
150	23.32	0.023	0.151	100.85	0.75	23067	23.07	553.6	17.30	415.20
151	23.31	0.023	0.151	100.85	0.75	23060	23.06	553.4	17.30	415.08
152	23.30	0.023	0.151	100.85	0.75	23053	23.05	553.3	17.29	414.96



153	23.30	0.023	0.151	100.85	0.75	23047	23.05	553.1	17.28	414.84
154	23.29	0.023	0.151	100.85	0.75	23040	23.04	553.0	17.28	414.72
155	23.28	0.023	0.150	100.85	0.75	23033	23.03	552.8	17.27	414.60
156	23.27	0.023	0.150	100.85	0.75	23026	23.03	552.6	17.27	414.48
157	23.27	0.023	0.150	100.85	0.75	23020	23.02	552.5	17.26	414.35
158	23.26	0.023	0.150	100.85	0.75	23013	23.01	552.3	17.26	414.23
159	23.25	0.023	0.150	100.85	0.75	23006	23.01	552.1	17.25	414.11
160	23.25	0.023	0.150	100.85	0.75	22999	23.00	552.0	17.25	413.99
161	23.24	0.023	0.150	100.85	0.75	22993	22.99	551.8	17.24	413.87
162	23.23	0.023	0.150	100.85	0.75	22986	22.99	551.7	17.24	413.75
163	23.23	0.023	0.150	100.85	0.75	22979	22.98	551.5	17.23	413.63
164	23.22	0.023	0.150	100.85	0.75	22973	22.97	551.3	17.23	413.51
165	23.21	0.023	0.150	100.85	0.75	22966	22.97	551.2	17.22	413.38
166	23.21	0.023	0.149	100.85	0.75	22959	22.96	551.0	17.22	413.26
167	23.20	0.023	0.149	100.85	0.75	22952	22.95	550.9	17.21	413.14
168	23.19	0.023	0.149	100.85	0.75	22946	22.95	550.7	17.21	413.02
169	23.19	0.023	0.149	100.85	0.75	22939	22.94	550.5	17.20	412.90
170	23.18	0.023	0.149	100.85	0.75	22932	22.93	550.4	17.20	412.78
171	23.17	0.023	0.149	100.85	0.75	22925	22.93	550.2	17.19	412.66
172	23.17	0.023	0.149	100.85	0.75	22919	22.92	550.1	17.19	412.54
173	23.16	0.023	0.149	100.85	0.75	22912	22.91	549.9	17.18	412.42
174	23.15	0.023	0.149	100.85	0.75	22905	22.91	549.7	17.18	412.30
175	23.15	0.023	0.149	100.85	0.75	22899	22.90	549.6	17.17	412.18
176	23.14	0.023	0.149	100.85	0.75	22892	22.89	549.4	17.17	412.06
177	23.13	0.023	0.149	100.85	0.75	22885	22.89	549.2	17.16	411.93
178	23.12	0.023	0.148	100.85	0.75	22879	22.88	549.1	17.16	411.81
179	23.12	0.023	0.148	100.85	0.75	22872	22.87	548.9	17.15	411.69
180	23.11	0.023	0.148	100.85	0.75	22865	22.87	548.8	17.15	411.57
181	23.10	0.023	0.148	100.85	0.75	22859	22.86	548.6	17.14	411.45
182	23.10	0.023	0.148	100.85	0.75	22852	22.85	548.4	17.14	411.33
183	23.09	0.023	0.148	100.85	0.75	22845	22.85	548.3	17.13	411.21
184	23.08	0.023	0.148	100.85	0.75	22838	22.84	548.1	17.13	411.09
185	23.08	0.023	0.148	100.85	0.75	22832	22.83	548.0	17.12	410.97
186	23.07	0.023	0.148	100.85	0.75	22825	22.83	547.8	17.12	410.85
187	23.06	0.023	0.148	100.85	0.75	22818	22.82	547.6	17.11	410.73
188	23.06	0.023	0.148	100.85	0.75	22812	22.81	547.5	17.11	410.61
189	23.05	0.023	0.147	100.85	0.75	22805	22.81	547.3	17.10	410.49
190	23.04	0.023	0.147	100.85	0.75	22798	22.80	547.2	17.10	410.37
191	23.04	0.023	0.147	100.85	0.75	22792	22.79	547.0	17.09	410.25



192	23.03	0.023	0.147	100.85	0.75	22785	22.79	546.8	17.09	410.13
193	23.02	0.023	0.147	100.85	0.75	22778	22.78	546.7	17.08	410.01
194	23.02	0.023	0.147	100.85	0.75	22772	22.77	546.5	17.08	409.89
195	23.01	0.023	0.147	100.85	0.75	22765	22.77	546.4	17.07	409.77
196	23.00	0.023	0.147	100.85	0.75	22759	22.76	546.2	17.07	409.65
197	23.00	0.023	0.147	100.85	0.75	22752	22.75	546.0	17.06	409.53
198	22.99	0.023	0.147	100.85	0.75	22745	22.75	545.9	17.06	409.41
199	22.98	0.023	0.147	100.85	0.75	22739	22.74	545.7	17.05	409.29
200	22.98	0.023	0.147	100.85	0.75	22732	22.73	545.6	17.05	409.18
201	22.97	0.023	0.146	100.85	0.75	22725	22.73	545.4	17.04	409.06
202	22.96	0.023	0.146	100.85	0.75	22719	22.72	545.2	17.04	408.94
203	22.96	0.023	0.146	100.85	0.75	22712	22.71	545.1	17.03	408.82
204	22.95	0.023	0.146	100.85	0.75	22705	22.71	544.9	17.03	408.70
205	22.94	0.023	0.146	100.85	0.75	22699	22.70	544.8	17.02	408.58
206	22.94	0.023	0.146	100.85	0.75	22692	22.69	544.6	17.02	408.46
207	22.93	0.023	0.146	100.85	0.75	22686	22.69	544.5	17.01	408.34
208	22.92	0.023	0.146	100.85	0.75	22679	22.68	544.3	17.01	408.22
209	22.92	0.023	0.146	100.85	0.75	22672	22.67	544.1	17.00	408.10
210	22.91	0.023	0.146	100.85	0.75	22666	22.67	544.0	17.00	407.98
211	22.90	0.023	0.146	100.85	0.75	22659	22.66	543.8	16.99	407.86
212	22.90	0.023	0.146	100.85	0.75	22652	22.65	543.7	16.99	407.74
213	22.89	0.023	0.145	100.85	0.75	22646	22.65	543.5	16.98	407.63
214	22.88	0.023	0.145	100.85	0.75	22639	22.64	543.3	16.98	407.51
215	22.88	0.023	0.145	100.85	0.75	22633	22.63	543.2	16.97	407.39
216	22.87	0.023	0.145	100.85	0.75	22626	22.63	543.0	16.97	407.27
217	22.86	0.023	0.145	100.85	0.75	22619	22.62	542.9	16.96	407.15
218	22.86	0.023	0.145	100.86	0.75	22613	22.61	542.7	16.96	407.03
219	22.85	0.023	0.145	100.86	0.75	22606	22.61	542.6	16.95	406.91
220	22.84	0.023	0.145	100.86	0.75	22600	22.60	542.4	16.95	406.79
221	22.84	0.023	0.145	100.86	0.75	22593	22.59	542.2	16.94	406.68
222	22.83	0.023	0.145	100.86	0.75	22587	22.59	542.1	16.94	406.56
223	22.82	0.023	0.145	100.86	0.75	22580	22.58	541.9	16.93	406.44
224	22.82	0.023	0.144	100.86	0.75	22573	22.57	541.8	16.93	406.32
225	22.81	0.023	0.144	100.86	0.75	22567	22.57	541.6	16.93	406.20
226	22.80	0.023	0.144	100.86	0.75	22560	22.56	541.4	16.92	406.08
227	22.80	0.023	0.144	100.86	0.75	22554	22.55	541.3	16.92	405.97
228	22.79	0.023	0.144	100.86	0.75	22547	22.55	541.1	16.91	405.85
229	22.78	0.023	0.144	100.86	0.75	22541	22.54	541.0	16.91	405.73
230	22.78	0.023	0.144	100.86	0.75	22534	22.53	540.8	16.90	405.61



231	22.77	0.023	0.144	100.86	0.75	22527	22.53	540.7	16.90	405.49
232	22.76	0.023	0.144	100.86	0.75	22521	22.52	540.5	16.89	405.37
233	22.76	0.023	0.144	100.86	0.75	22514	22.51	540.3	16.89	405.26
234	22.75	0.023	0.144	100.86	0.75	22508	22.51	540.2	16.88	405.14
235	22.74	0.023	0.144	100.86	0.75	22501	22.50	540.0	16.88	405.02
236	22.74	0.023	0.143	100.86	0.75	22495	22.49	539.9	16.87	404.90
237	22.73	0.023	0.143	100.86	0.75	22488	22.49	539.7	16.87	404.78
238	22.72	0.023	0.143	100.86	0.75	22482	22.48	539.6	16.86	404.67
239	22.72	0.023	0.143	100.86	0.75	22475	22.47	539.4	16.86	404.55
240	22.71	0.023	0.143	100.86	0.75	22468	22.47	539.2	16.85	404.43
241	22.70	0.023	0.143	100.86	0.75	22462	22.46	539.1	16.85	404.31
242	22.70	0.023	0.143	100.86	0.75	22455	22.46	538.9	16.84	404.20
243	22.69	0.023	0.143	100.86	0.75	22449	22.45	538.8	16.84	404.08
244	22.68	0.023	0.143	100.86	0.75	22442	22.44	538.6	16.83	403.96
245	22.68	0.023	0.143	100.86	0.75	22436	22.44	538.5	16.83	403.84
246	22.67	0.023	0.143	100.86	0.75	22429	22.43	538.3	16.82	403.73
247	22.66	0.023	0.143	100.86	0.75	22423	22.42	538.1	16.82	403.61
248	22.66	0.023	0.142	100.86	0.75	22416	22.42	538.0	16.81	403.49
249	22.65	0.023	0.142	100.86	0.75	22410	22.41	537.8	16.81	403.37
250	22.64	0.023	0.142	100.86	0.75	22403	22.40	537.7	16.80	403.26
251	22.64	0.023	0.142	100.86	0.75	22397	22.40	537.5	16.80	403.14
252	22.63	0.023	0.142	100.86	0.75	22390	22.39	537.4	16.79	403.02
253	22.62	0.023	0.142	100.86	0.75	22384	22.38	537.2	16.79	402.91
254	22.62	0.023	0.142	100.86	0.75	22377	22.38	537.1	16.78	402.79
255	22.61	0.023	0.142	100.86	0.75	22371	22.37	536.9	16.78	402.67
256	22.60	0.023	0.142	100.86	0.75	22364	22.36	536.7	16.77	402.55
257	22.60	0.023	0.142	100.86	0.75	22358	22.36	536.6	16.77	402.44
258	22.59	0.023	0.142	100.86	0.75	22351	22.35	536.4	16.76	402.32
259	22.58	0.023	0.142	100.86	0.75	22345	22.34	536.3	16.76	402.20
260	22.58	0.023	0.141	100.86	0.75	22338	22.34	536.1	16.75	402.09
261	22.57	0.023	0.141	100.86	0.75	22332	22.33	536.0	16.75	401.97
262	22.56	0.023	0.141	100.86	0.75	22325	22.33	535.8	16.74	401.85
263	22.56	0.023	0.141	100.86	0.75	22319	22.32	535.6	16.74	401.74
264	22.55	0.023	0.141	100.86	0.75	22312	22.31	535.5	16.73	401.62
265	22.54	0.023	0.141	100.86	0.75	22306	22.31	535.3	16.73	401.50
266	22.54	0.023	0.141	100.86	0.75	22299	22.30	535.2	16.72	401.39
267	22.53	0.023	0.141	100.86	0.75	22293	22.29	535.0	16.72	401.27
268	22.52	0.023	0.141	100.86	0.75	22286	22.29	534.9	16.71	401.15
269	22.52	0.023	0.141	100.86	0.75	22280	22.28	534.7	16.71	401.04



270	22.51	0.023	0.141	100.86	0.75	22273	22.27	534.6	16.70	400.92
271	22.50	0.023	0.141	100.86	0.75	22267	22.27	534.4	16.70	400.80
272	22.50	0.022	0.140	100.86	0.75	22260	22.26	534.2	16.70	400.69
273	22.49	0.022	0.140	100.86	0.75	22254	22.25	534.1	16.69	400.57
274	22.49	0.022	0.140	100.86	0.75	22247	22.25	533.9	16.69	400.45
275	22.48	0.022	0.140	100.86	0.75	22241	22.24	533.8	16.68	400.34
276	22.47	0.022	0.140	100.86	0.75	22235	22.23	533.6	16.68	400.22
277	22.47	0.022	0.140	100.86	0.75	22228	22.23	533.5	16.67	400.11
278	22.46	0.022	0.140	100.86	0.75	22222	22.22	533.3	16.67	399.99
279	22.45	0.022	0.140	100.86	0.75	22215	22.22	533.2	16.66	399.87
280	22.45	0.022	0.140	100.86	0.75	22209	22.21	533.0	16.66	399.76
281	22.44	0.022	0.140	100.86	0.75	22202	22.20	532.9	16.65	399.64
282	22.43	0.022	0.140	100.86	0.75	22196	22.20	532.7	16.65	399.53
283	22.43	0.022	0.140	100.86	0.75	22189	22.19	532.5	16.64	399.41
284	22.42	0.022	0.140	100.86	0.75	22183	22.18	532.4	16.64	399.29
285	22.41	0.022	0.139	100.86	0.75	22177	22.18	532.2	16.63	399.18
286	22.41	0.022	0.139	100.86	0.75	22170	22.17	532.1	16.63	399.06
287	22.40	0.022	0.139	100.86	0.75	22164	22.16	531.9	16.62	398.95
288	22.39	0.022	0.139	100.86	0.75	22157	22.16	531.8	16.62	398.83
289	22.39	0.022	0.139	100.86	0.75	22151	22.15	531.6	16.61	398.72
290	22.38	0.022	0.139	100.86	0.75	22144	22.14	531.5	16.61	398.60
291	22.37	0.022	0.139	100.86	0.75	22138	22.14	531.3	16.60	398.49
292	22.37	0.022	0.139	100.86	0.75	22132	22.13	531.2	16.60	398.37
293	22.36	0.022	0.139	100.86	0.75	22125	22.13	531.0	16.59	398.25
294	22.35	0.022	0.139	100.86	0.75	22119	22.12	530.9	16.59	398.14
295	22.35	0.022	0.139	100.86	0.75	22112	22.11	530.7	16.58	398.02
296	22.34	0.022	0.139	100.86	0.75	22106	22.11	530.5	16.58	397.91
297	22.34	0.022	0.138	100.86	0.75	22100	22.10	530.4	16.57	397.79
298	22.33	0.022	0.138	100.86	0.75	22093	22.09	530.2	16.57	397.68
299	22.32	0.022	0.138	100.86	0.75	22087	22.09	530.1	16.57	397.56
300	22.32	0.022	0.138	100.86	0.75	22080	22.08	529.9	16.56	397.45
301	22.31	0.022	0.138	100.86	0.75	22074	22.07	529.8	16.56	397.33
302	22.30	0.022	0.138	100.86	0.75	22068	22.07	529.6	16.55	397.22
303	22.30	0.022	0.138	100.86	0.75	22061	22.06	529.5	16.55	397.10
304	22.29	0.022	0.138	100.86	0.75	22055	22.05	529.3	16.54	396.99
305	22.28	0.022	0.138	100.86	0.75	22048	22.05	529.2	16.54	396.87
306	22.28	0.022	0.138	100.86	0.75	22042	22.04	529.0	16.53	396.76
307	22.27	0.022	0.138	100.86	0.75	22036	22.04	528.9	16.53	396.64
308	22.26	0.022	0.138	100.86	0.75	22029	22.03	528.7	16.52	396.53



309	22.26	0.022	0.138	100.86	0.75	22023	22.02	528.6	16.52	396.41
310	22.25	0.022	0.137	100.86	0.75	22017	22.02	528.4	16.51	396.30
311	22.24	0.022	0.137	100.86	0.75	22010	22.01	528.2	16.51	396.18
312	22.24	0.022	0.137	100.86	0.75	22004	22.00	528.1	16.50	396.07
313	22.23	0.022	0.137	100.86	0.75	21997	22.00	527.9	16.50	395.95
314	22.23	0.022	0.137	100.86	0.75	21991	21.99	527.8	16.49	395.84
315	22.22	0.022	0.137	100.86	0.75	21985	21.98	527.6	16.49	395.73
316	22.21	0.022	0.137	100.86	0.75	21978	21.98	527.5	16.48	395.61
317	22.21	0.022	0.137	100.86	0.75	21972	21.97	527.3	16.48	395.50
318	22.20	0.022	0.137	100.86	0.75	21966	21.97	527.2	16.47	395.38
319	22.19	0.022	0.137	100.86	0.75	21959	21.96	527.0	16.47	395.27
320	22.19	0.022	0.137	100.86	0.75	21953	21.95	526.9	16.46	395.15
321	22.18	0.022	0.137	100.86	0.75	21947	21.95	526.7	16.46	395.04
322	22.17	0.022	0.136	100.86	0.75	21940	21.94	526.6	16.46	394.93
323	22.17	0.022	0.136	100.86	0.75	21934	21.93	526.4	16.45	394.81
324	22.16	0.022	0.136	100.86	0.75	21928	21.93	526.3	16.45	394.70
325	22.15	0.022	0.136	100.86	0.75	21921	21.92	526.1	16.44	394.58
326	22.15	0.022	0.136	100.86	0.75	21915	21.91	526.0	16.44	394.47
327	22.14	0.022	0.136	100.86	0.75	21909	21.91	525.8	16.43	394.35
328	22.14	0.022	0.136	100.86	0.75	21902	21.90	525.7	16.43	394.24
329	22.13	0.022	0.136	100.86	0.75	21896	21.90	525.5	16.42	394.13
330	22.12	0.022	0.136	100.86	0.75	21890	21.89	525.4	16.42	394.01
331	22.12	0.022	0.136	100.86	0.75	21883	21.88	525.2	16.41	393.90
332	22.11	0.022	0.136	100.86	0.75	21877	21.88	525.0	16.41	393.79
333	22.10	0.022	0.136	100.86	0.75	21871	21.87	524.9	16.40	393.67
334	22.10	0.022	0.136	100.86	0.75	21864	21.86	524.7	16.40	393.56
335	22.09	0.022	0.135	100.86	0.75	21858	21.86	524.6	16.39	393.44
336	22.08	0.022	0.135	100.86	0.75	21852	21.85	524.4	16.39	393.33
337	22.08	0.022	0.135	100.86	0.75	21845	21.85	524.3	16.38	393.22
338	22.07	0.022	0.135	100.86	0.75	21839	21.84	524.1	16.38	393.10
339	22.06	0.022	0.135	100.86	0.75	21833	21.83	524.0	16.37	392.99
340	22.06	0.022	0.135	100.86	0.75	21826	21.83	523.8	16.37	392.88
341	22.05	0.022	0.135	100.87	0.75	21820	21.82	523.7	16.37	392.76
342	22.05	0.022	0.135	100.87	0.75	21814	21.81	523.5	16.36	392.65
343	22.04	0.022	0.135	100.87	0.75	21808	21.81	523.4	16.36	392.54
344	22.03	0.022	0.135	100.87	0.75	21801	21.80	523.2	16.35	392.42
345	22.03	0.022	0.135	100.87	0.75	21795	21.80	523.1	16.35	392.31
346	22.02	0.022	0.135	100.87	0.75	21789	21.79	522.9	16.34	392.20
347	22.01	0.022	0.135	100.87	0.75	21782	21.78	522.8	16.34	392.08



348	22.01	0.022	0.134	100.87	0.75	21776	21.78	522.6	16.33	391.97
349	22.00	0.022	0.134	100.87	0.75	21770	21.77	522.5	16.33	391.86
350	21.99	0.022	0.134	100.87	0.75	21764	21.76	522.3	16.32	391.74
351	21.99	0.022	0.134	100.87	0.75	21757	21.76	522.2	16.32	391.63
352	21.98	0.022	0.134	100.87	0.75	21751	21.75	522.0	16.31	391.52
353	21.98	0.022	0.134	100.87	0.75	21745	21.74	521.9	16.31	391.41
354	21.97	0.022	0.134	100.87	0.75	21739	21.74	521.7	16.30	391.29
355	21.96	0.022	0.134	100.87	0.75	21732	21.73	521.6	16.30	391.18
356	21.96	0.022	0.134	100.87	0.75	21726	21.73	521.4	16.29	391.07
357	21.95	0.022	0.134	100.87	0.75	21720	21.72	521.3	16.29	390.95
358	21.94	0.022	0.134	100.87	0.75	21713	21.71	521.1	16.29	390.84
359	21.94	0.022	0.134	100.87	0.75	21707	21.71	521.0	16.28	390.73
360	21.93	0.022	0.134	100.87	0.75	21701	21.70	520.8	16.28	390.62
361	21.92	0.022	0.133	100.87	0.75	21695	21.69	520.7	16.27	390.50
362	21.92	0.022	0.133	100.87	0.75	21688	21.69	520.5	16.27	390.39
363	21.91	0.022	0.133	100.87	0.75	21682	21.68	520.4	16.26	390.28
364	21.91	0.022	0.133	100.87	0.75	21676	21.68	520.2	16.26	390.17
365	21.90	0.022	0.133	100.87	0.75	21670	21.67	520.1	16.25	390.05



SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA

- [par. 1.1] GIORGIO CANCELLIERE – XXI Secolo (2010) - L'oro blu: la battaglia per l'acqua
https://www.treccani.it/enciclopedia/l-oro-blu-la-battaglia-per-l-acqua_%28XXI-Secolo%29/
- [par. 1.2] SCIENCEDIRECT - Renewable and Sustainable Energy Reviews (2015)
- [par. 1.2] SCIENCEDIRECT - Methodology of Feasibility Studies of Micro – Hydro power plants in Cameroon: Case of the Micro –hydro of KEMKEN (2017)
- [par. 1.2] RESEARCH ARTICLE - Barriers related to the deployment of renewable energies in Cameroon and ways to strengthen policies (2019)
- [par. 3.2] ARCS – 2019 Bilancio sociale
- [par. 3.2] CALOGERO MESSINA – Acqua potabile di Bankondji: un sogno diventato realtà
<https://www.arcsculturesolidali.org/2017/03/16/acqua-potabile-di-bankondji-un-sogno-diventato-realta/>
- [par. 3.3] ARCS – Le système d'adduction d'eau potable de Bankondji
- [par. 3.3] ARCS – Annexe 2 SOURCES D'ENERGIE
- [par. 3.3] ARCS – Annexe 3 TRAITEMENT DES EAUX
- [par. 3.3] ARCS – Annexe 5 – RESEAU
- [par. 4.1] ARCS – Micro-centrale hydroélectrique pour l'auto-production de l'énergie électrique
- [par.4.3 – cap.5] DIFFUSIONE INDUSTRIALE <https://diffusioneindustriale.com/it/>
- [par.4.3 – cap.5] IMEC <https://www.imec-risanamenti.it/it/rivestimento-condotte-cose-e-come-funziona.html>
- [par. 4.4 – 4.5] European Small Hydropower Association – ESHA 2007 – Guida alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico
- [par.4.5] TSCHURTSCHENTHALER TURBINENBAU <http://www.turbinenbau-sexten.it/>
- [par.4.5] MISA <https://misaitalia.it/>



RINGRAZIAMENTI

Vorrei dedicare questo spazio a chi, con dedizione e pazienza, ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato.

Un ringraziamento particolare va alla mia relatrice Butera Ilaria che mi ha seguito, con la sua infinita disponibilità, in ogni step della realizzazione dell'elaborato, fin dalla scelta dell'argomento.

Grazie al mio correlatore ing. Pagano Michele per i suoi preziosi consigli e per avermi suggerito puntualmente le giuste modifiche da apportare alla mia tesi.

Grazie anche al mio correlatore ing. Noubondieu Serge per avermi spronato nel mio percorso di tesi e avermi trasmesso l'amore per la sua terra.

Ringrazio le aziende Tschurtschenthaler turbinenbau, Misa e IMEC che mi hanno aiutato nel produrre l'elaborato di tesi, nonostante la loro mole di lavoro.

Ringrazio i miei genitori, perché senza di loro non avrei mai potuto intraprendere questo percorso di studi.

Infine, dedico questa tesi a me stessa, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi hanno permesso di arrivare fin qui.