

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Partecipazione di utenti passivi al mercato dei servizi di dispacciamento: il caso di un Data Center bitcoin mining

Relatore:

Prof. Marco Merlo

Co-Relatore:

Prof. Ferdinando Maria Ametrano

Candidato:

Simone Colombo - 863491

Anno accademico 2018-19

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Marco Merlo per avermi dato l'opportunità di lavorare alla tematica affrontata e per il supporto ed il tempo dedicato durante la stesura del presente elaborato di tesi.

Ringrazio il Professore Ferdinando Maria Ametrano e l'Ingegner Paolo Mazzocchi per le preziose spiegazioni fornitemi sul tema Bitcoin, frutto dell'esperienza di anni di lavoro.

Un sentito ringraziamento ai miei genitori, per avermi permesso di intraprendere questo percorso accademico e per avermi supportato nel periodo di studi e di tesi.

Ringrazio con affetto la mia ragazza Anna, per il sostegno, l'amore, la serenità e la complicità dimostratami in questi anni.

Un ringraziamento speciale ai miei fratelli, Samuele ed Erika, ai loro compagni, Marion e Francesco, e alla mia nipotina Lauréne, per avermi sollevato il morale quando ne avevo bisogno.

Ringrazio tutti i miei zii e i miei cugini, soprattutto Federico e zio Stefano, per avermi regalato momenti di svago nei periodi difficili, e ringrazio Andrea per il prezioso supporto informatico ricevuto durante lo sviluppo della tesi.

Un sincero ringraziamento ai miei compagni di università Marco, Andrea, Katia ed in particolare Sara, per aver condiviso questi anni di laurea magistrale ma soprattutto per l'amicizia dimostrata.

Infine, ringrazio tutti i miei amici per i momenti di svago concessi tra un esame e l'altro e per la possibilità di festeggiare insieme il raggiungimento di questo traguardo.

Sommario

Lo sviluppo di questo elaborato ha come scopo quello di valutare la possibilità di utilizzo di un Data Center che svolge il processo di mining di bitcoin nella fornitura di un servizio di flessibilità alla rete di dispacciamento per il tramite del Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD); nell'ottica dei progetti pilota UVAC (Unità Virtuali Abilitate di Consumo), proposti dal Gestore della rete di dispacciamento (TERNA) in collaborazione con ARERA (l'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente), questo servizio consiste nel mettersi a disposizione a fornire una regolazione nella modalità “a salire”, ossia riducendo il prelievo di corrente elettrica, in orari e giorni prestabiliti attraverso offerte di vendita giornaliere effettuate presso il MSD durante la fase ex-ante.

Verrà proposta una modellazione dell'attività di mining che farà riferimento a serie storiche del prezzo di bitcoin e dei principali parametri della rete Bitcoin; anche gli esiti del MSD si baseranno su una modellazione facente riferimento alle dinamiche dell'andamento reale del mercato elettrico.

Il Net Cash Flow (NCF) sarà il parametro economico utilizzato per confrontare diverse soluzioni impiantistiche (Data Center con o senza gruppi elettrogeni di emergenza) per diverse condizioni al contorno (costo di corrente elettrica, durata del contratto stabilito con il gestore di rete, fase del ciclo finanziario di bitcoin), al fine di verificare se e per quali condizioni l'utilizzo del Data Center di mining come risorsa di flessibilità risulta essere economicamente conveniente.

Key words: Mercato dei Servizi di Dispacciamento, mining bitcoin, Data Center

Abstract

The purpose of this paper is to evaluate the possibility of using a Data Center that performs the bitcoin mining process in providing a flexibility service to the ancillary network via the Ancillary Services Market (MSD); in view of the UVAC pilot projects (Unità Virtuali Abilitate di Consumo) proposed by the ancillary network operator (TERNA) in collaboration with ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente), this service consists in making oneself available to supply an adjustment in the "to rise" mode, that is reducing the draw of electricity, in pre-established times through daily sales offers made at the MSD during the ex-ante phase.

The proposed mining activity's model will refer to historical bitcoin price series and the main parameters of the bitcoin network; also, the results of the MSD will be based on a modelling referring to the dynamics of the actual trend of the electricity market.

The Net Cash Flow (NCF) will be the economic parameter used to compare different plant solutions (Data Center with or without emergency generators) for different boundary conditions (cost of electricity, contract duration established with the network manager, phase of the financial cycle of bitcoin), in order to verify if and for what conditions the use of the mining Data Center as a resource of flexibility turns out to be economically convenient.

Key words: Ancillary Services Market, bitcoin mining, Data Center

Sommario esteso

Le sempre più stringenti normative europee riguardanti l'efficienza energetica, la decarbonizzazione e l'aumento delle quote di energia rinnovabile, hanno portato a rivedere la struttura del Sistema Elettrico Nazionale; si è difatti assistito ad una crescente diffusione delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) non programmabili e della Generazione Distribuita (GD), contraddistinti per loro natura da una intermittenza e incertezza previsionale di energia; contemporaneamente si è verificata anche una progressiva riduzione degli impianti programmabili, storicamente garanti dell'equilibrio tra domanda e offerta di energia elettrica. Queste condizioni hanno portato ad una conseguente riduzione delle disponibilità di risorse per la riserva primaria e terziaria e all'aumento delle congestioni locali. La rapida evoluzione verso questo nuovo contesto energetico ha quindi portato alla necessità di riformare il servizio di dispacciamento con l'obiettivo di garantire la sicurezza e l'efficienza del sistema elettrico; per far fronte a questo bisogno, Terna ha promosso, in accordo con ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente), nuove iniziative volte ad abilitare un maggior numero di risorse tali da offrire una più elevata flessibilità al Sistema Elettrico Nazionale.

A partire da giugno 2017 sono stati avviati diversi progetti pilota che prevedono la costituzione di aggregati, denominati UVA (Unità Virtuali Abilitate), tali da non violare i perimetri definiti da Terna. Questi aggregati possono essere costituiti da sole unità di produzione non rilevanti, compresi i sistemi di accumulo (UVAP), da sole unità di consumo (UVAC), da un insieme di unità di produzioni rilevanti UVAP e UVAC (si parla in questo caso di UVAM) ed infine da unità di produzione rilevanti e/o non rilevanti con la presenza eventuale di unità di consumo, tutte ubicate all'interno dello stesso nodo della rete di trasmissione nazionale (UVAN).

Nel presente elaborato si è voluto valutare la fattibilità tecnico-economica di un Data Center di mining di bitcoin qualora venisse utilizzato come UVAC e iniziasse a fornire un servizio di regolazione per il tramite del Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD).

Con il termine Bitcoin si indica sia la rete peer-to-peer decentralizzata all'interno della quale i nodi comunicano tra di loro sottostando ad una serie di regole definite dal protocollo Bitcoin (un software opensource), sia la moneta virtuale utilizzata per immagazzinare e trasferire valore tra i partecipanti di questo network (in questo caso verrà scritta con la “b” minuscola per differenziarla).

Il mining di bitcoin è un processo energivoro che consiste nel risolvere il problema del Proof of Work (PoW) ossia un problema matematico basato su un algoritmo crittografico di hashing (SHA256); degli hardware specializzati a svolgere efficientemente questa specifica funzione competono per trovare la soluzione. Chi per primo ci riesce, salva sulla blockchain di Bitcoin il blocco dati contenente le transazioni avvenute nel frattempo, estendendo così di un'ulteriore unità la catena di blocchi preesistente; viene inoltre ricompensato con bitcoin nuovi di zecca e con le commissioni delle transazioni contenute nel blocco stesso.

La moneta bitcoin possiede un controvalore in moneta fiat che segue le normali regole del mercato di compravendita; il mining risulterà quindi un processo profittevole qualora il valore dei bitcoin “vinti” superasse il costo di corrente elettrica necessaria alle operazioni di mining svolte.

Il Data Center di bitcoin, grazie alla nuova apertura del MSD verso le unità di consumo, può essere visto (in termini di progetti pilota) come un'UVAC che fornisce il servizio di regolazione del MSD attraverso la modalità “a salire”, ossia riducendo il prelievo di corrente elettrica o equivalentemente aumentandone l'immissione; in qualità di UVAC esso può:

- partecipare alla creazione di riserva terziaria nella *fase di programmazione* (del Mercato dei Servizi di Dispacciamento o MSD);
- fornire il servizio di Bilanciamento in tempo reale nella *fase di bilanciamento* (del MSD).

Il soggetto titolare dell'UVAC dovrà inviare quotidianamente un'offerta al Gestore della rete, comprendente il valore di prezzo e di quantità di energia elettrica che intende fornire come servizio di regolazione.

L'elemento principale di un Data Center di mining è il *miner*, l'hardware che svolge il processo di mining. Affinché siano profittevoli nell'arco della loro vita utile, i miner vengono fatti funzionare 24h; qualora dovessero svolgere anche il servizio di regolazione del MSD, la remunerazione per la partecipazione a questo servizio dovrebbe, come minimo,

compensare i mancati ricavi dati dallo spegnimento delle macchine o da una loro parzializzazione. A tal proposito, verrà calcolato il minimo valore di offerta che dovrà essere presentato al MSD e il valore incrementale che sommato a quest'ultimo porterebbe alla massimizzazione del profitto.

Generalmente, i Data Center di dimensioni maggiori sono alimentati in condizioni di emergenza da UPS e gruppi elettrogeni; risulta quindi interessante verificare anche l'impatto economico di un Data Center che possiede uno di questi sistemi di alimentazione, dimensionati appositamente per intervenire durante la fornitura del servizio di regolazione.

Si farà riferimento a un modello che simula l'andamento dei risultati delle offerte che il titolare dell'UVAC dovrà mandare quotidianamente durante la fase ex-ante del MSD: attraverso la raccolta di dati storici dei risultati di mercato della fase ex-ante del MSD si ipotizza che la probabilità di una sua accettazione segua un andamento di tipo gaussiano tra un valore medio ponderato delle offerte di valore massimo accettate e quelle di valore minimo.

Un secondo modello utilizzato sarà quello che simula il funzionamento del Data Center di mining considerando come ipotesi l'appartenenza ad una mining pool che detiene una percentuale importante del totale dell'Hash rate fornito alla rete Bitcoin; ciò permetterà di eliminare la deviazione standard sui ricavi ottenuti. A parità di Hash rate generato dalle apparecchiature del Data Center, i ricavi saranno funzione essenzialmente del prezzo che assume l'asset bitcoin e del parametro di "Difficoltà" della rete Bitcoin; quest'ultimo viene aggiornato ogni 2016 blocchi minati (2 settimane circa) e indica quanto è difficile minare un blocco rispetto ad un valore di riferimento. Nelle diverse simulazioni si ipotizza di avviare un Data Center ex-novo che possiede hardware con i migliori valori di efficienza disponibili due mesi prima dell'inizio dell'attività (si tiene in considerazione dei tempi di consegna e installazione). I calcoli si baseranno sui dati storici dei principali parametri di mining, quali il prezzo di bitcoin, la difficolta, l'Hash rate della rete Bitcoin, etc. I consumi di energia elettrica del Data Center si riferiranno sia a quelli delle apparecchiature che a quelli del sistema di raffreddamento e illuminazione; per questi ultimi si utilizzerà un parametro tipico denominato PUE, definito come il rapporto tra il consumo energetico totale del Data Center e il consumo delle sole apparecchiature. Si ipotizza che l'impianto sia molto efficiente e che il suo PUE sia pari a 1,2.

I calcoli del NCF faranno riferimento ai costi d’investimento del Data Center e ai ricavi e costi operativi del processo di mining; qualora esso fornisse il servizio di regolazione, si aggiungerebbero i costi di adeguamento per l’installazione dei sistemi di controllo UPMC e per la sua gestione, i ricavi forniti da TERNA come remunerazione per il servizio ricevuto, suddivisi in una componente fissa stabilita in seguito ad un’asta a ribasso a partire da 30.000 €/MWh e una variabile di valore massimo pari a 400 €/MWh (quest’ultima riconosciuta solo nel caso di attivazione dell’offerta ricevuta tramite MSD); qualora si stesse valutando il caso in cui fosse presente l’accumulatore (UPS) o il gruppo elettrogeno diesel, bisognerebbe considerare anche la quota di ammortamento del sistema di alimentazione e ulteriori costi operativi (costo di acquisto del gasolio per il gruppo elettrogeno, costi di ricarica e costo di perdita capacità di carica per l’accumulatore). Qualora il soggetto responsabile si rendesse disponibile (tramite offerte opportune) a fornire il servizio di regolazione per l’intera fascia oraria stabilita da TERNA, riceverebbe una remunerazione fissa pari al 200% l’assegnazione dell’asta a ribasso (60.000 [€/MW/anno]). L’offerta dovrà comunque essere fatta per almeno il 70% dei giorni del periodo di validità, pena il mancato riconoscimento del corrispettivo fisso.

Si ipotizza inoltre che, qualora l’offerta quotidiana venga accettata e attivata, TERNA invii non più di un ordine di dispacciamento al giorno (più quello di revoca) per richiedere un servizio di regolazione della durata di 3 o 6 ore, a seconda della disponibilità fornita, da effettuare all’interno dell’intervallo temporale di possibile regolazione (14.00 – 18.00 da lunedì a venerdì). Il Data Center di mining dovrà tenersi a disposizione nel fornire il servizio di flessibilità all’interno di quell’orario. Per semplicità si considera che tutte le offerte accettate in fase ex-ante MSD vengano poi attivate.

Verranno confrontati qualitativamente e quantitativamente i risultati economici in termini di Net Cash Flow (NCF) ottenuti da 7 scelte impiantistiche differenti (per tipologia e/o funzione), 6 delle quali fornenti il servizio di regolazione (per 3 o 6 ore) e 4 delle quali aventi anche un sistema di alimentazione di emergenza; queste scelte verranno inoltre confrontate per diversi intervalli temporali (coincidenti con l’ipotetica durata del contratto stipulato con TERNA, ossia 6 mesi e 1 anno), per diversi costi di energia elettrica (0,15 e 0,10 €/kWh), per diverse fasi del mercato finanziario (fase accumulativa, distributiva e trend) e per diversi cicli di mercato.

Indice

Ringraziamenti	I
Sommario	III
Abstract.....	V
Sommario esteso.....	VII
Indice	XI
Indice delle figure.....	XV
Indice delle tabelle.....	XIX
1 Introduzione	1
2 Sistema elettrico nazionale.....	3
2.1 Mercato elettrico italiano.....	4
2.1.1 Mercato del giorno prima (MGP).....	5
2.1.2 Mercato Infragiornaliero (MI)	7
2.1.3 Mercato dei Prodotti Giornalieri (MPEG).....	7
2.1.4 Mercato per il Servizio di Dispacciamento (MSD)	8
2.2 Dispacciamento	10
2.2.1 Utenti del Dispacciamento.....	11
2.2.2 Unità di Produzione	11
2.2.3 Unità di Consumo.....	12
2.2.4 Approccio zonale.....	13
2.3 Risorse per il dispacciamento	16
2.3.1 Congestioni in fase di programmazione	16
2.3.2 Regolazione primaria di frequenza e riserva primaria.....	17
2.3.2.1 Parametri utili	19

2.3.2.2	Condizioni normali di esercizio e di emergenza.....	21
2.3.3	Regolazione secondaria di frequenza e riserva secondaria	22
2.3.4	Regolazione terziaria di frequenza e riserva terziaria	23
2.3.5	Servizio di Bilanciamento	25
2.3.6	Servizio di interrompibilità del carico.....	26
2.3.7	Regolazione primaria e secondaria di tensione	26
2.3.8	Rifiuto del carico.....	28
2.3.9	Rialimentazione del sistema elettrico.....	29
2.3.10	Disponibilità al telescatto	29
2.4	Revisione della regolazione del dispacciamento.....	30
2.4.1	TIDE.....	31
2.4.2	Progetti pilota	32
2.4.2.1	UPR.....	33
2.4.2.2	UVAP.....	34
2.4.2.3	UVAC	37
2.4.2.4	UVAM	44
2.4.2.5	UVAN	47
2.4.2.6	Altri progetti pilota	48
3	Bitcoin.....	49
3.1	Rete Peer-to-Peer.....	51
3.2	Blockchain.....	53
3.2.1	Transazioni	55
3.2.2	Struttura di un blocco	57
3.3	Crittografia	60
3.3.1	Chiave privata	60
3.3.2	Chiave pubblica.....	60

3.3.3	Indirizzo bitcoin.....	62
3.3.4	Wallet	65
3.4	Mining	66
3.4.1	Hardware	70
3.4.2	Mining Pool	71
3.4.3	Hash Rate.....	77
3.4.4	Difficoltà.....	78
3.4.5	Efficienza.....	81
3.4.6	Diffusione a livello industriale e implicazioni sociopolitiche	82
3.4.7	Impatto ambientale	86
3.5	Teoria monetaria.....	87
4	Regolazione del processo di Mining entro una UVAC.....	89
4.1	Premessa	89
4.2	Data Center di mining	90
4.3	Studio schemi ciclici prezzo Bitcoin	92
4.4	Partecipazione a MSD	97
5	Metodologia di analisi proposta	99
5.1	Obiettivo	99
5.2	Caso senza regolazione.....	100
5.2.1	Dati di Input.....	109
5.2.2	Calcoli analitici.....	118
5.3	Scenari di studio	123
5.4	Modello di simulazione risultati MSD	125
5.5	UPS	131
5.6	GE.....	144
5.7	Caso con regolazione.....	157

5.7.1	Dati di Input	162
5.7.2	Calcoli analitici	164
5.7.3	Calcolo Offerta minima al MSD	183
6	Risultati e analisi.....	189
6.1	Offerta minima limite.....	189
6.2	Incremento rispetto offerta minima.....	193
6.3	Caso studio	196
6.4	Confronti grafici.....	203
6.4.1	Confronto tra diversi scenari	204
6.4.2	Confronto tra diversi prezzi di energia elettrica.....	208
6.4.3	Confronto tra diverse durate di contratto	213
7	Conclusioni	217
	Simbologia	221
	Bibliografia.....	227

Indice delle figure

Figura 2.1: Struttura generale di un sistema elettrica	3
Figura 2.2: La filiera del sistema elettrico nazionale	4
Figura 2.3: Organigramma mercato elettrico italiano	5
Figura 2.4: Esiti MGP del 19/09/2019, zona Nord.....	6
Figura 2.5: Topologia di interconnessione tra le zone geografiche e/o virtuali della struttura zonale	14
Figura 2.6: Campo di funzionamento ammissibile per le UP	18
Figura 2.7: Esempio di modalità corretta di regolazione per la compensazione della banda morta dei regolatori	20
Figura 2.8: Relazione tra UC e UVAC	38
Figura 2.9: Profilo qualitativo variazione di potenza UVAC in seguito a ricezione ordine di dispacciamento	41
Figura 3.1: Concentrazione dei nodi di Bitcoin nel mondo	52
Figura 3.2: Schematizzazione fork e blocchi orfani	55
Figura 3.3: Catena di transazioni.....	56
Figura 3.4: Struttura schematizzata di un blocco della rete Bitcoin	59
Figura 3.5: Esempio di Block header serializzato	59
Figura 3.6: Raprresentazione di una curva ellittica	61
Figura 3.7: Schematizzazione codifica Base58Check	63
Figura 3.8: Schematizzazione dell'intero processo di generazione di un indirizzo bitcoin	64
Figura 3.9: Albero di chiavi generato da un singolo seme	66
Figura 3.10: Totale bitcoin in circolazione nel tempo.....	69
Figura 3.11: Confronto dell'andamento nel tempo tra Hash rate teorico fornito e "Scoring Hash rate"	74
Figura 3.12: Confronto dell'andamento nel tempo tra Hash rate effettivo fornito e "Scoring Hash rate"	74
Figura 3.13: Distribuzione % Hash rate negli ultimi 7 giorni tra le varie mining pool, in data 16 settembre 2019	75

Figura 3.14: Andamento Hashrate globale della rete Bitcoin nel tempo a partire dal 2014 in data 24 agosto 2019	77
Figura 3.15: Andamento Difficolà rete Bitcoin nel tempo a partire dal 2014, in data 24 agosto 2019	80
Figura 3.16: Andamento di efficienza nel tempo degli ASIC di Bitcoin	82
Figura 3.17: Wenatchee, Stati Uniti	83
Figura 3.18: Mappa del mondo che mostra le regioni dove si sta sviluppando il mining di bitcoin	85
Figura 4.1: Fase ciclica andamento prezzo di Bitcoin 2011-12	93
Figura 4.2: Fase ciclica andamento prezzo di Bitcoin 2014-16	94
Figura 4.3: Fase ciclica andamento prezzo di Bitcoin 2017-19	94
Figura 4.4: Andamento dell'ultimo ciclo del prezzo di bitcoin (su scala decimale) e di Hashrate globale (su scala logaritmica)	96
Figura 5.1: Variazione nel tempo del rapporto Difficolà / Hash rate globale rete Bitcoin	104
Figura 5.2: Relazione tra Difficolà e Hash rate globale della rete di Bitcoin	104
Figura 5.3: Andamento efficienza minima dei miner nel tempo.....	106
Figura 5.4: Costo per unità di potenza al variare dell'efficienza.....	107
Figura 5.5: Variazione di potenza per singola unità di Asic di Bitcoin nel tempo	109
Figura 5.6: Esempio di Asic di Bitcoin: Bitmain Antminer S9 (13 Th)	112
Figura 5.7: Funzione di densità di probabilità (sopra) e funzione di ripartizione (sotto) .	127
Figura 5.8: Prezzo medio ponderato a salire zona Nord, prezzo marginale a salire zona Nord e numero di offerte accettate nazionali del 1° settembre 2017	129
Figura 5.9: Probabilità di accettazione	131
Figura 5.10: Esempio di variazione nel tempo della capacità di carica di un accumulatore tra il valore massimo e minimo secondo le ipotesi fatte	136
Figura 5.11: Andamento della linea di tendenza logaritmica del rendimento (in arancione) e del costo su unità di potenza (in azzurro) di un GE	148
Figura 5.12: Capacità del serbatoio al variare della potenza del GE	148
Figura 5.13: Profilo qualitativo variazione di potenza Data Center di mining in seguito a ricezione ordine di dispacciamento	160

Figura 5.13: Profilo qualitativo variazione di potenza Data Center di mining in seguito a ricezione ordine di dispacciamento	160
Figura 6.1: NCF a fine contratto e n° offerte accettate al variare dell'offerta minima limite in condizioni di fase distributiva, costo en. el. 0,15 €/kWh e 1 anno di contratto nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3	191
Figura 6.2: NCF a fine contratto e n° offerte accettate al variare dell'incremento di offerta minima in condizioni di fase distributiva, costo en. el. 0,15 €/kWh e 1 anno di contratto nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3	195
Figura 6.3: NCF per condizione A	197
Figura 6.4: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione A	199
Figura 6.5: NCF per condizione B	200
Figura 6.6: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione B	201
Figura 6.7: NCF per condizione C	202
Figura 6.8: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione C	203
Figura 6.9: Confronto NCF tra condizione D e E.....	204
Figura 6.10: Confronto NCF tra condizione B e F.....	205
Figura 6.11: Confronto NCF tra condizione G e H	207
Figura 6.12: Confronto NCF tra condizione A e I.....	208
Figura 6.13: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione I	209
Figura 6.14: Confronto NCF tra condizione B e L.....	210
Figura 6.15: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione L ...	211
Figura 6.16: Confronto NCF tra condizione C e M.....	212
Figura 6.17: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione M ..	213
Figura 6.18: Confronto NCF tra condizione A e N	214
Figura 6.19: Confronto NCF tra condizione B e D	215
Figura 6.20:Confronto NCF tra condizione C e H	216

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Orario sessioni Mercato Infragiornaliero	7
Tabella 2.2: Orario sottofasi di programmazione MSD ex-ante	9
Tabella 2.3: Orario diverse sessioni del MB	10
Tabella 2.4: Assegnazioni d'asta per la componente fissa nei vari progetti pilota UVAC .	43
Tabella 3.1: Lista delle prime 10 mining pool degli ultimi 7 giorni in data 16 settembre 2019	76
Tabella 3.2: Distribuzione del mining globale	86
Tabella 3.3: Penetrazione delle rinnovabili nel mining globale	86
Tabella 5.1: Specifiche tecniche Bitmain Antminer S9 (13 TH)	113
Tabella 5.2:Prezzi finali dell'energia elettrica al lordo delle imposte per i consumatori industriali di diversi paesi europei nel 2017	115
Tabella 5.3: Livello di efficienza dei Data Center	117
Tabella 5.4: Stima del numero di cicli di carica/scarica per una batteria agli ioni di Litio a vari DOD	132
Tabella 5.5: Perdita di capacità di carica al variare della carica e della temperatura	133
Tabella 5.6: DOD, Perdita di capacità di carica P_{ciclo} e $Ps - d$ [%/anno] al variare del numero e durata degli interventi annui	141
Tabella 5.7: Perdita di capacità di carica P_{ciclo} e $Ps - d$ [%/giorno] al variare della frequenza di cicli annui e della loro durata.....	142
Tabella 5.8: Energia disponibile dal GE in funzione delle ore continuative a cui sarà chiamato a funzionare.....	150
Tabella 5.9: Caratteristiche tecniche singole unità del GE utilizzabili.....	151
Tabella 5.10: Risultati caratteristiche GE per 50 interventi all'anno	152
Tabella 5.11: Risultati caratteristiche GE per 150 interventi all'anno	153
Tabella 5.12: Risultati caratteristiche GE per 250 interventi all'anno	153
Tabella 6.1: Offerta minima limite per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3	190

Tabella 6.2: Offerta minima limite per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 2.....	192
Tabella 6.3: Incremento sull'offerta minima per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3	193
Tabella 6.4: Incremento sull'offerta minima per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 2	196
Tabella 6.5: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione D	205
Tabella 6.6: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione E.....	205
Tabella 6.7: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione B	206
Tabella 6.8: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione F.....	206
Tabella 6.9: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione G	207
Tabella 6.10: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione H	207

1 Introduzione

La riduzione degli impianti programmabili, che contribuiscono a mantenere l'equilibrio tra domanda e offerta di energia elettrica, unita alla rapida diffusione degli impianti derivanti da fonti energetiche non programmabili, in particolare eolico e fotovoltaico, hanno condotto ad una sostanziale riduzione della disponibilità di risorse per la riserva primaria ed al conseguente aumento delle congestioni locali.

Per rispondere al repentino cambiamento del mercato energetico in atto e garantire la continuità, affidabilità ed efficienza dell'approvvigionamento elettrico, nasce l'esigenza di attuare un'importante riforma del servizio di dispacciamento. L'ente adibito alla gestione del dispacciamento, Terna, in accordo con ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente), ha lavorato in questa direzione promuovendo recentemente importanti iniziative con l'obiettivo di aumentare la flessibilità e l'offerta di risorse all'interno del Sistema Elettrico Nazionale. La delibera 300/2017/R/eel ha infatti previsto una prima apertura del mercato dei servizi di dispacciamento (MSD) alle unità di produzione non ancora abilitate, inclusi i sistemi di accumulo, dando inizio ad una fase sperimentale tramite l'avvio di progetti pilota, al fine di rendere disponibile fin da subito nuove risorse di dispacciamento.

In questo nuovo scenario, i Data Center, ovvero gli impianti di consumo che grazie alle loro caratteristiche sono particolarmente adatti a fornire servizi di flessibilità alla rete elettrica, hanno avuto la possibilità di offrire tali prestazioni in cambio di una retribuzione. La diffusione su larga scala negli ultimi anni di un particolare Data Center che svolge il processo di mining, gergalmente chiamato “mining farm”, ha indotto nella valutazione di una sua possibile applicazione come risorsa di flessibilità. Il seguente elaborato è frutto di uno studio eseguito, tramite simulazioni eseguite su Excel, per verificare la fattibilità tecnico-economica di questa nuova applicazione.

1. Introduzione

I contenuti dell’elaborato di tesi sono stati organizzati in sei capitoli, in aggiunta a questo introduttivo (Capitolo 1), nella seguente modalità:

- Inquadramento normativo e contestualizzazione del Sistema Elettrico Nazionale e della nuova apertura del mercato dei servizi di spacciamento. (capitolo 2)
- Rielaborazione dei contenuti della letteratura e delle principali nozioni teoriche sul Bitcoin (Capitolo 3);
- Studio interfacciamento tra rete elettrica e Bitcoin nell’ottica della fornitura di un servizio di flessibilità (Capitolo 4);
- Descrizione dei criteri e delle procedure di analisi utilizzate nella valutazione dell’impatto economico di un Data Center di mining che svolge la sola funzione di mining e di un Data Center di mining che fornisce in aggiunta un servizio di regolazione alla rete di dispacciamento; per quest’ultimo caso, vengono valutate diverse configurazioni impiantistiche (capitolo 5);
- Sintesi dei risultati economici conseguiti dalle simulazioni e confronto tra diversi possibili scenari (Capitolo 6);
- Considerazioni finali, commenti sugli esiti scaturiti dalle analisi del capitolo precedente e suggerimenti sulle possibili linee di sviluppo (Capitolo 7).

2 Sistema elettrico nazionale

Il sistema elettrico nazionale è articolato in tre fasi: *produzione*, *trasmissione* e *distribuzione* di energia elettrica [1] (vedi Figura 2.1).

- ***Produzione***: l'energia elettrica non esiste in natura; per ottenerla, le centrali elettriche devono trasformare l'energia ricavata dalle fonti primarie (rinnovabili e non);
- ***Trasmissione***: il termine indica il trasferimento dell'energia prodotta dai centri di produzione verso le zone di consumo. Questo processo avviene in alta tensione (380 kV - 220 kV - 150 kV) ed è svolto da *Terna*; quest'ultima possiede e gestisce la “Rete di trasmissione”, costituita da linee elettriche (oltre 66.000 km), stazioni elettriche e stazioni di trasformazione;
- ***Distribuzione***: la consegna di elettricità in media tensione (fra 1 e 35 kV) e bassa tensione (inferiore a 1 kV) ai vari utenti.

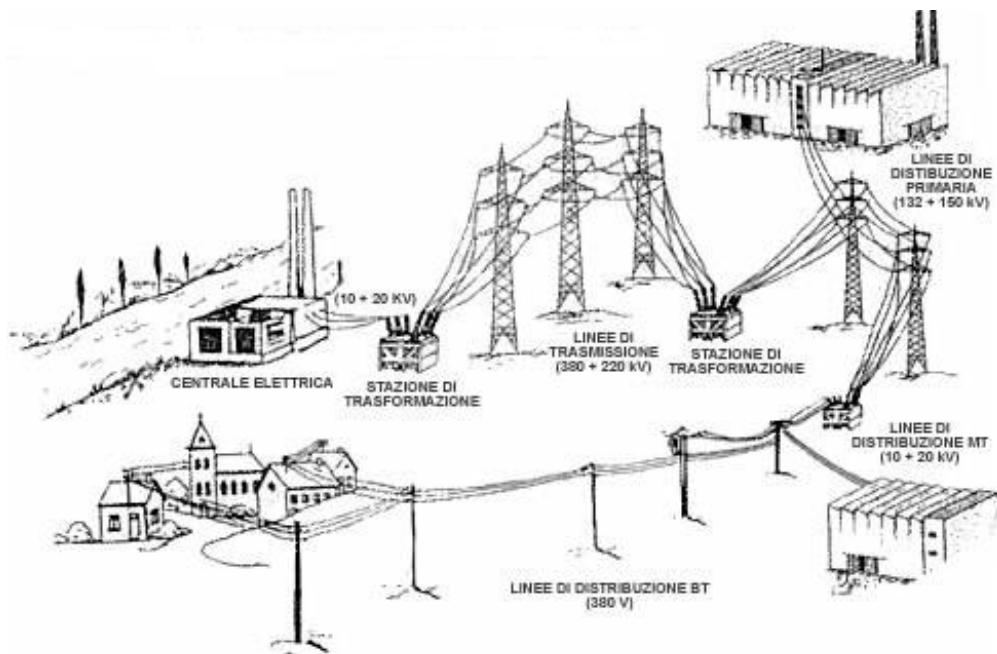


Figura 2.1: Struttura generale di un sistema elettrica

2.1 Mercato elettrico italiano

Il mercato elettrico in Italia (vedi Figura 2.2) nasce per effetto del decreto legislativo 16 marzo 1999, n.79 (d.lgs. n. 79/99), nell'ambito del processo di recepimento della direttiva comunitaria sulla creazione di un mercato interno dell'energia (96/92/CE).

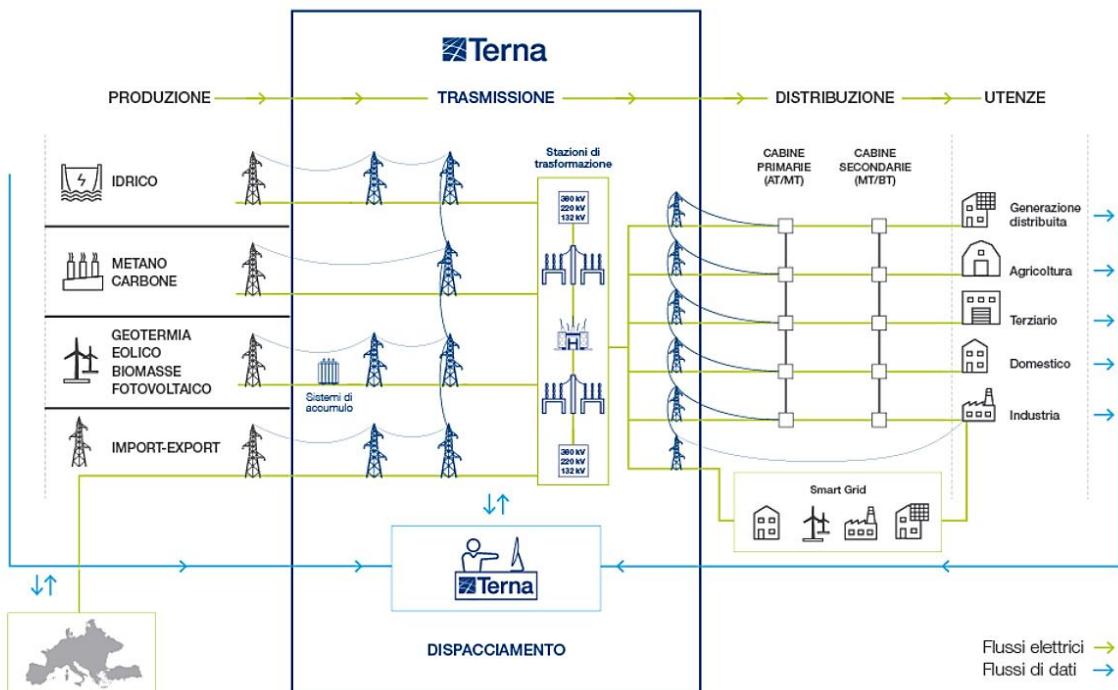


Figura 2.2: La filiera del sistema elettrico nazionale [2]

La sua creazione risponde a due esigenze ben precise:

- la promozione, secondo criteri di neutralità, trasparenza ed obiettività, della competizione nelle attività di produzione e di compravendita di energia elettrica;
- la gestione economica dei servizi di dispacciamento.

Il mercato elettrico si articola nel **Mercato elettrico a pronti** (MPE) e nel **Mercato elettrico a termine** (MTE), vedi Figura 2.3. A sua volta il MPE si suddivide in:

- Mercato del Giorno Prima (MGP)
- Mercato Infragiornaliero (MI)

- Mercato dei Prodotti Giornalieri (**MPEG**)
- Mercato del Servizio di Dispacciamento (**MSD**)

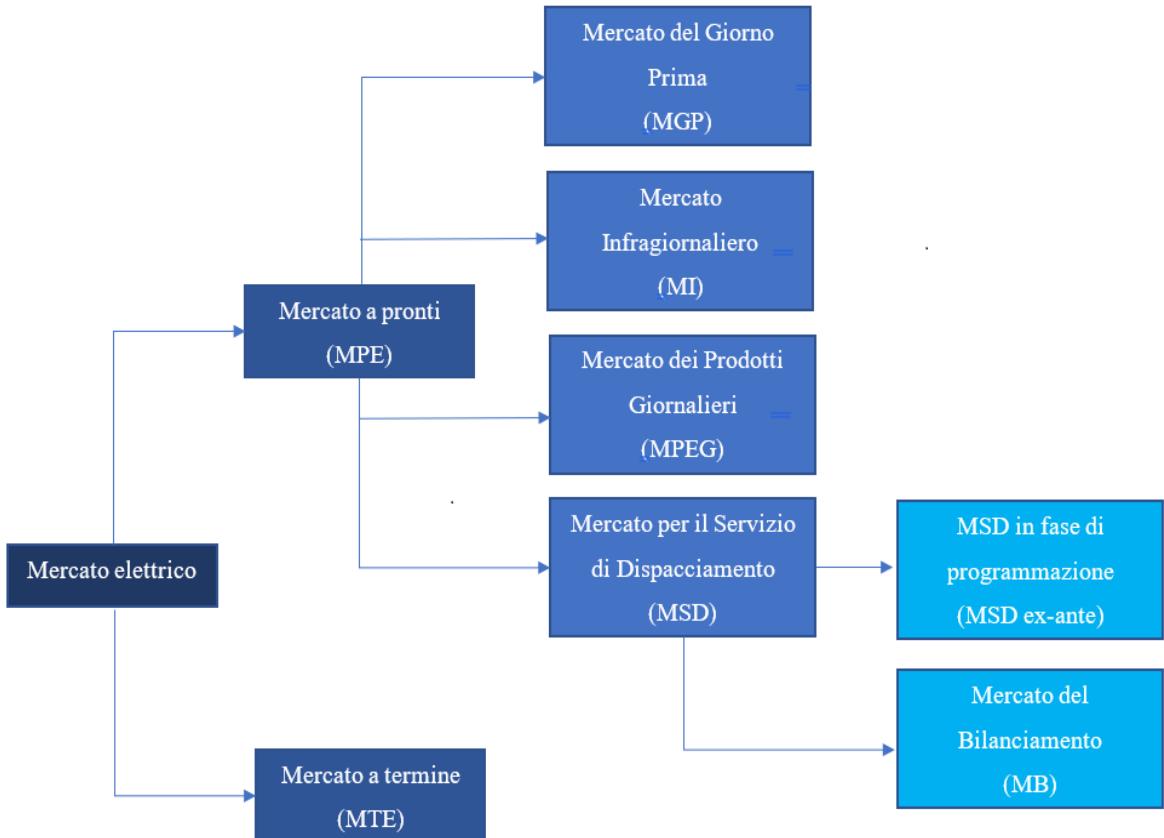


Figura 2.3: Organigramma mercato elettrico italiano

Nel MGP, MI e MPEG, il Gestore dei Mercati Energetici (GME) agisce come controparte centrale.

2.1.1 Mercato del giorno prima (MGP)

Il *Mercato del Giorno Prima (MGP)* è un mercato d'asta che ospita la maggior parte delle transazioni di compravendita di energia elettrica; gli *operatori energetici* presentano offerte,

2. Sistema elettrico nazionale

sottoforma di blocchi orari di energia per il giorno successivo, nelle quali indicano la quantità ed il prezzo massimo/minimo alle quali sono disposti ad acquistare/vendere.

La seduta del MGP apre alle ore 8.00 del nono giorno antecedente il giorno di consegna e chiude alle ore 12.00 del giorno precedente il giorno di consegna. Gli esiti del MGP vengono comunicati entro le ore 12.55 del giorno precedente il giorno di consegna.

Le offerte sono accettate dopo la chiusura della seduta di mercato, sulla base del merito economico e nel rispetto dei limiti di transito tra le zone.

Le offerte di acquisto accettate e riferite alle unità di consumo appartenenti alle zone geografiche italiane sono valorizzate al Prezzo Unico Nazionale (PUN), pari alla media dei prezzi delle zone geografiche ponderata per le quantità acquistate in tali zone. [3]

In Figura 2.4 è riportato un esempio di esito del MGP per un determinato giorno.

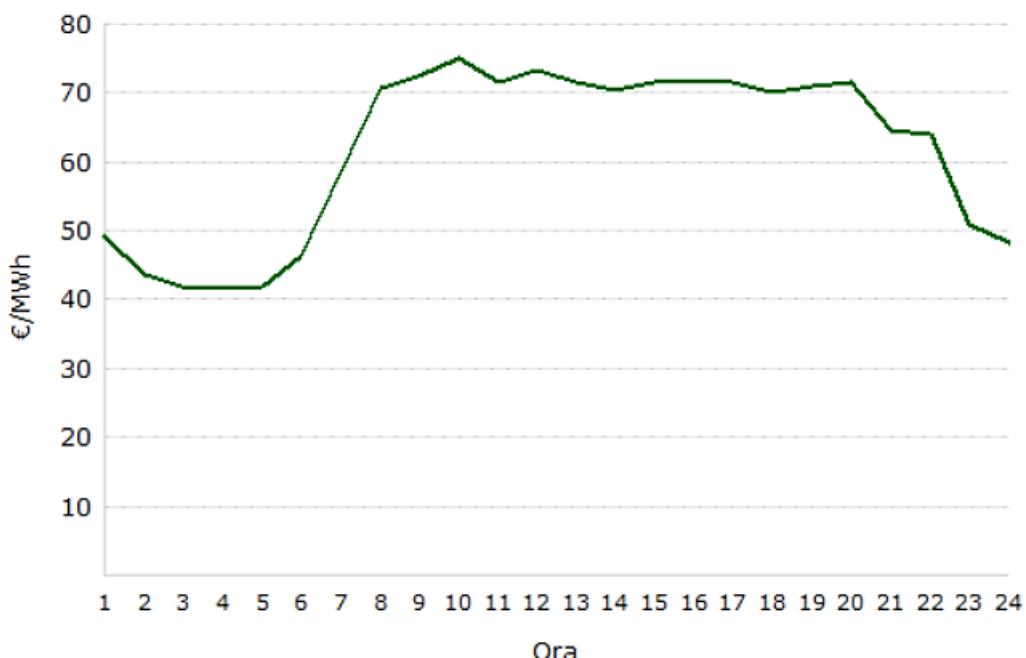


Figura 2.4: Esiti MGP del 19/09/2019, zona Nord

2.1.2 Mercato Infragiornaliero (MI)

Il Mercato Infragiornaliero (MI) consente agli operatori di apportare modifiche ai programmi definiti nel MGP attraverso ulteriori offerte di acquisto o vendita. Il MI si svolge in sette sessioni: MI1, MI2, MI3, MI4, MI5, MI6, MI7 i cui orari sono riportati in Tabella 2.1.

Giorno di riferimento	D-1		D				
	MI1	MI2	MI3	MI4	MI5	MI6	MI7
Informazioni preliminari	15.00	16.30	23.45*	3.45	7.45	11.15	15.45
Apertura seduta	12.55	12.55	17.30*	17.30*	17.30*	17.30*	17.30*
Chiusura seduta	15.00	16.30	23.45*	3.45	7.45	11.15	15.45
Esiti definitivi	15.30	17.00	0.15	4.15	8.15	11.45	16.15

Tabella 2.1: Orario sessioni Mercato Infragiornaliero

* l'ora è riferita al giorno D-1, ossia il giorno antecedente a quello di consegna.

Le offerte di acquisto e vendita vengono selezionate sulla base dello stesso criterio descritto per il MGP.

A differenza di MGP le offerte di acquisto accettate sono valorizzate al prezzo zonale. [3]

2.1.3 Mercato dei Prodotti Giornalieri (MPEG)

Il Mercato dei prodotti giornalieri (MPEG) è la sede per la negoziazione dei prodotti giornalieri con obbligo di consegna dell'energia.

Sul MPEG sono automaticamente ammessi tutti gli operatori del mercato elettrico.

2. Sistema elettrico nazionale

Le negoziazioni sul MPEG si svolgono in modalità continua.

Sul MPEG sono negoziabili prodotti giornalieri con:

- “*differenziale unitario di prezzo*”, per i quali il prezzo indicato nella formulazione delle offerte (in esito alla fase di negoziazione) è l’espressione del differenziale, rispetto al PUN, al quale gli operatori sono disposti a negoziare tali prodotti;
- “*prezzo unitario pieno*”, per i quali il prezzo indicato nella formulazione delle offerte (in esito alla fase di negoziazione) è l’espressione del valore unitario di scambio dell’energia elettrica oggetto dei contratti negoziati.

I profili di consegna possono essere del tipo:

- *Baseload*, quotato per tutti i giorni di calendario, il cui sottostante è l’energia elettrica da consegnare in tutti i periodi rilevanti appartenenti al giorno oggetto di negoziazione;
- *Peak Load*, quotato per i giorni dal lunedì al venerdì, il cui sottostante è l’energia elettrica da consegnare nei periodi rilevanti dal nono al ventesimo appartenenti al giorno oggetto di negoziazione.

I prodotti con “differenziale unitario di prezzo”, con profili di consegna Baseload e Peak Load, sono quelli che negoziabili sul MPEG.

Solo gli operatori del mercato elettrico che sono anche operatori della Piattaforma Conti Energia (PCE) abilitati a registrare transazioni sui conti energia possono acquistare e vendere prodotti giornalieri sul MPEG.

Le sessioni del MPEG si svolgono nei giorni feriali, dalle ore 8.00 alle ore 17.00 di D-2 e dalle ore 8.00 alle ore 9.00 di D-1. [3]

2.1.4 Mercato per il Servizio di Dispacciamento (MSD)

Il Mercato per il Servizio di Dispacciamento (MSD) è lo strumento attraverso il quale Terna S.p.A. (TERNA) si approvvigiona delle risorse necessarie alla gestione e al controllo della

rete di trasmissione; il suo scopo principale è quello di risolvere le congestioni intrazonali, creare riserve di energia e fornire il servizio di bilanciamento in tempo reale. [3]

TERNA agisce come controparte centrale e, prima dell'apertura del MSD, effettua la verifica dei programmi accettati nei mercati dell'energia (MGP e MI) in relazione alla capacità fisica della rete di trasmissione.

Il sistema di remunerazione è del tipo “*pay as bid*”: in seguito ad un'asta a ribasso, la remunerazione per ogni blocco di potenza accettato è pari al prezzo di offerta per il blocco stesso. [4]

Il MSD si articola in una fase di programmazione (MSD ex-ante) e nel Mercato del Bilanciamento (MB):

- Il **MSD ex - ante** si articola a sua volta in sei sottofasi di programmazione: MSD1, MSD2, MSD3, MSD4, MSD5 e MSD6 (vedi Tabella 2.2).

Giorno di riferimento	D-1	D					
	MSD1	MSD2	MSD3	MSD4	MSD5	MSD6	
Informazioni preliminari	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Apertura seduta	12.55	*	*	*	*	*	
Chiusura seduta	17.30	*	*	*	*	*	
Esiti definitivi	21.45	2.15	6.15	10.15	14.15	18.15	

Tabella 2.2: Orario sottofasi di programmazione MSD ex-ante

* Si utilizzano le offerte presentate sul MSD1

Su MSD ex-ante, Terna accetta offerte di acquisto e vendita di energia ai fini della risoluzione delle congestioni residue e della costituzione dei margini di riserva e le riferisce al GME il quale, a sua volta, comunica agli operatori gli esiti delle singole sessioni e i programmi post MSD ex-ante di immissione e prelievo agli utenti del dispacciamento.

2. Sistema elettrico nazionale

- Il *Mercato del Bilanciamento* (**MB**) è articolato in diverse sessioni nelle quali Terna accetta offerte di acquisto e vendita di energia al fine svolgere il servizio di regolazione secondaria e mantenere il bilanciamento, nel tempo reale, tra immissione e prelievi di energia sulla rete.

Attualmente il MB è articolato in 6 sessioni. Per la prima sessione del MB vengono considerate le offerte valide presentate dagli operatori nella precedente sessione del MSD ex-ante. Per le successive sessioni del MB, le relative sedute per la presentazione delle offerte si aprono non prima che siano stati resi noti gli esiti della precedente sessione del MSD ex-ante (vedi Tabella 2.3). [3]

Giorno di riferimento	D-1	D					
	MB1	MB2	MB3	MB4	MB5	MB6	
Informazioni preliminari	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Apertura seduta	°	22.30*	22.30*	22.30*	22.30*	22.30*	22.30*
Chiusura seduta	°	3.00	7.00	11.00	15.00	19.00	
Esiti definitivi	n.d.	#	#	#	#	#	

Tabella 2.3: Orario diverse sessioni del MB

* l'ora è riferita al giorno D-1, ossia il giorno antecedente a quello di consegna.

° Si utilizzano le offerte presentate sul MSDI

Disciplina del dispacciamento

2.2 Dispacciamento

“Il dispacciamento è l’attività diretta ad impartire disposizioni per l’utilizzazione e l’esercizio coordinato degli impianti di produzione e della rete di trasmissione dell’energia elettrica, nonché dei servizi ausiliari” [5]

Non essendo conveniente immagazzinare l'energia elettrica, risulta necessario monitorare la quantità di energia prodotta e consumata per tutte le linee della rete, istante per istante, al fine di assicurare la continuità e la sicurezza dell'approvvigionamento.

Sulla base di dati storici e non, l'ente adibito a gestire il dispacciamento (TERNA) provvede alla stima dei carichi giornalieri, stabilendo così i piani di produzione delle centrali elettriche.

Il “*Codice della rete*” disciplina le procedure per le attività di trasmissione, dispacciamento, sviluppo, manutenzione e sicurezza della rete.

2.2.1 Utenti del Dispacciamento

Gli **Utenti del Dispacciamento** (UdD) sono produttori, clienti finali o grossisti con cui Terna regola il servizio di dispacciamento; è possibile una distinzione tra Utenti del Dispacciamento *in immissione* (produttori e trader) e *in prelievo* (trader e clienti finali, incluso l'acquirente unico). Gli UdD sono tenuti a stipulare con il Gestore della rete un contratto di servizio di dispacciamento, condizione necessaria per immettere/prelevare energia elettrica nella rete, nel quale sono contenuti i diritti e gli obblighi tra le due parti contraenti. [6]

2.2.2 Unità di Produzione

Una **Unità di Produzione** (UP) è costituita da una o più sezioni di un impianto di produzione.

Il raggruppamento di più sezioni in un'unica UP è possibile:

- per sezioni non alimentate da fonti rinnovabili, se la potenza complessiva non è superiore a 50 MVA;
- per sezioni alimentate da fonti rinnovabili e in cogenerazione.

2. Sistema elettrico nazionale

Le sezioni devono inoltre essere appartenenti ad un medesimo impianto di produzione, la cui generazione sia riferibile ad una sola fonte primaria di energia e per un unico punto di immissione.

È possibile classificare le UP in:

- **UP rilevanti:** UP con potenza complessiva dei gruppi di generazione associati non inferiore a 10 MVA;
- **UP non rilevanti:** tutte quelle UP che apparterrebbero alla categoria sopra citata se non fosse per il contesto in cui sono inserite che ne limita l'erogazione sulla rete a valori inferiori rispetto a quelli di soglia.

Ciascuna UP deve essere registrata nel sistema GAUDÌ, acronimo di “*Gestione Anagrafica Unica Degli Impianti di produzione*”, condizione che permette la partecipazione al MGP, MI e MSD.

Per le UP rilevanti iscritte in GAUDÌ, il produttore è tenuto a dichiarare e a tenere aggiornato (per il tramite della procedura “RUP dinamico”) i dati tecnici dei gruppi di generazione costituenti le UP, al fine di poter consentire attendibili valutazioni di carattere statistico-dinamico del SEN (Sistema Elettrico Nazionale) da parte del Gestore della rete.

Le UP rilevanti non iscritte in GAUDÌ non possono partecipare al Mercato elettrico (MGP, MI, MSD).

Il Gestore della rete si riserva la possibilità di precludere temporaneamente l'accesso a GAUDÌ, allo scopo di garantire e salvaguardare il buon funzionamento tecnico ed un utilizzo efficiente dello stesso. [6]

2.2.3 Unità di Consumo

Le **Unità di Consumo** (UC) sono unità non rilevanti; il *periodo rilevante* per le UC è l'ora.

Il punto di dispacciamento delle UC è costituito dall'insieme dei punti di prelievo; l'energia elettrica prelevata da questi punti viene aumentata di un valore percentuale, per tenere conto delle perdite sulle reti.

Ad ogni UP rilevante verrà associata una UC alla quale verranno contabilizzati i consumi qualora prelevasse energia elettrica dalla rete (ad esempio in fase di avviamento, fermata, etc.).

Il Gestore della rete registra ciascuna UC nel *Registro delle Unità di Consumo (RUC)*, nel quale si trova anche la qualificazione per la partecipazione delle unità al MGP e al MI. [6]

2.2.4 Approccio zonale

L'attuale disegno dei mercati elettrici in Italia prevede un **approccio di tipo zonale**, nel quale la *Rete di Trasmissione Nazionale* (RTN) viene rappresentata attraverso una struttura semplificata che, aggregando i singoli nodi elettrici in zone di mercato tra loro connesse e limitandone opportunamente lo scambio, consente di implementare negli algoritmi di selezione delle offerte i vincoli derivanti da una limitata capacità di trasporto della rete.

TERNA, fin dall'avvio del mercato elettrico in Italia, ha definito e sottoposto all'AEEGSI (attuale ARERA: *Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente*) per approvazione, le diverse configurazioni zonali da adottare con una cadenza tipicamente triennale. [7]

La configurazione zonale attualmente vigente (dal 1° gennaio 2019) prevede l'associazione regioni-zone, rappresentata in Figura 2.5.

2. Sistema elettrico nazionale

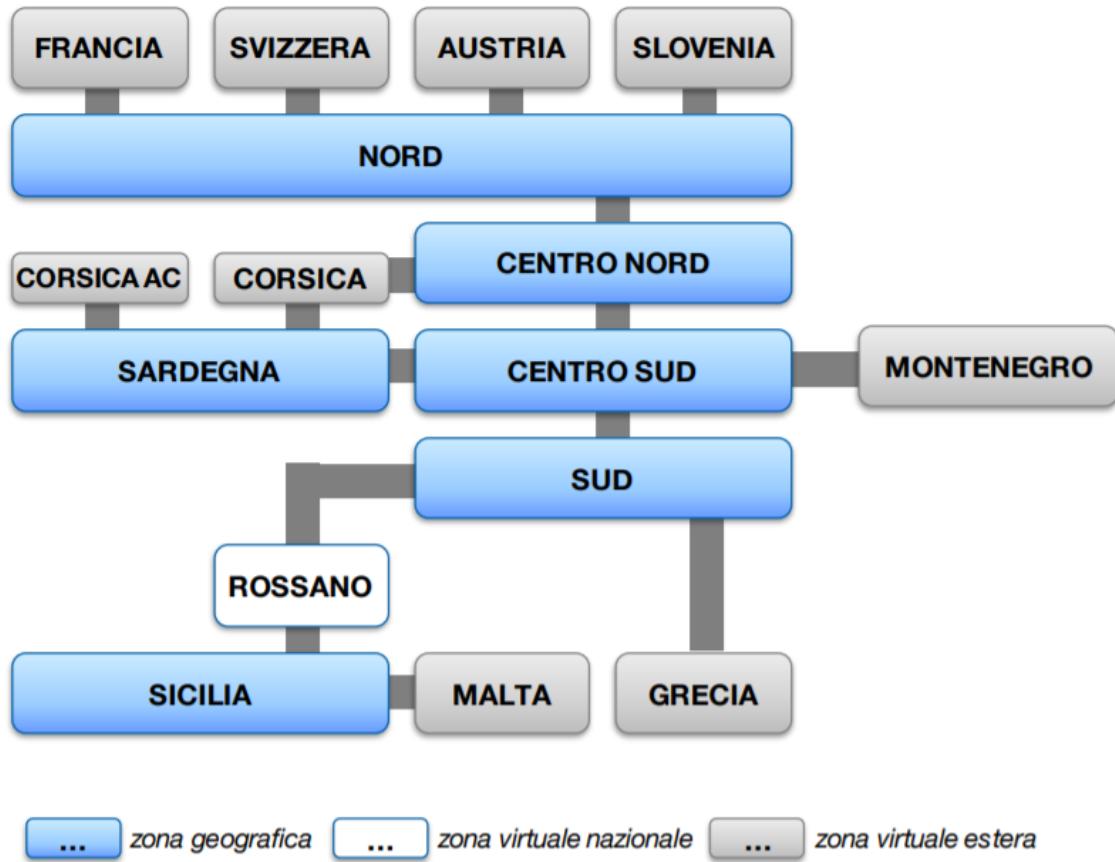


Figura 2.5: Topologia di interconnessione tra le zone geografiche e/o virtuali della struttura zonale [8]

Ognuna delle zone in cui è stata effettuata la suddivisione è definita “**zona della rete rilevante**”, ossia una porzione di RTN per la quale esistono, ai fini della sicurezza del sistema elettrico, limiti fisici di scambio dell’energia con altre zone confinanti. Tali limiti sono determinati ricorrendo ad un modello di calcolo basato sul bilancio tra generazione e consumi.

Le zone della rete rilevante possono essere:

- aree geografiche fisiche;
- *zone virtuali* (senza un diretto corrispondente fisico);
- *poli di produzione limitata* (zone virtuali costituite da un insieme di UP connesse alla RTN per le quali esistono vincoli di rete sulla massima potenza complessiva erogabile).

Le zone geografiche che costituiscono l'attuale struttura zonale sono la *zona Nord* (Valle D'Aosta, Piemonte, Liguria, Lombardia, Trentino-Alto Adige, Veneto, Friuli-Venezia Giulia, Emilia-Romagna), la *zona Centro Nord* (Toscana, Umbria e Marche), la *zona Centro Sud* (Lazio, Abruzzo e Campania), la *zona Sud* (Molise, Puglia, Basilicata e Calabria), la *zona Sicilia* ed infine la *zona Sardegna*.

Le zone virtuali sono Francia, Svizzera, Corsica, Corsica AC, Austria, Slovenia, Grecia, Malta, Montenegro.

La zona virtuale con polo di produzione limitata è la zona di Rossano. [8]

Il *processo di individuazione* delle zone della rete rilevante è stato effettuato sulla base:

- del criterio di sicurezza N-1, considerando diversi scenari della rete elettrica e diversi periodi stagionali dell'anno;
- dei flussi di potenza, che nelle situazioni di esercizio più frequenti, interessano la RTN;
- della dislocazione delle unità di produzione sul territorio nazionale e delle importazioni di energia elettrica dall'estero.

Si vuole inoltre evitare congestioni significative al variare delle immissioni e dei prelievi di energia elettrica all'interno di ciascuna zona geografica, con la corrispondente rete integra.

La struttura della RTN presenta naturalmente delle “*sezioni*” (intese come linee ideali che separano la rete in più parti) lungo le quali, in determinate condizioni di esercizio, è più probabile che possano verificarsi congestioni di rete.

In generale una sezione di rete si dice:

- “*strutturalmente critica*” se esistono degli assetti di produzione interni alle zone che non permettono in condizioni di sicurezza il libero transito di energia tra zone adiacenti con tutti gli elettrodotti in servizio oppure a seguito di eventuali indisponibilità di una o più linee relative alla stessa sezione;

2. Sistema elettrico nazionale

- “*operativamente critica*” quando la potenza transitante su di essa è superiore al valore di soglia strutturale.

Sulle sezioni critiche è stata posta l’attenzione per la suddivisione della rete rilevante in zone.

In generale l’approccio zonale semplifica la gestione della rete di trasmissione nel MGP e nel MI; il mercato viene eseguito verificando che siano rispettati i vincoli di scambio tra le zone.

2.3 Risorse per il dispacciamento

Al fine di mantenere il Sistema Elettrico Nazionale in sicurezza, il Gestore della rete (TERNA) si deve approvvigionare delle risorse per:

- la risoluzione delle congestioni;
- la riserva primaria, secondaria e terziaria di potenza;
- il servizio di interrompibilità;
- la riserva reattiva per la regolazione primaria e secondaria di tensione.

2.3.1 Congestioni in fase di programmazione

I *programmi aggiornati cumulati* di immissione e prelievo possono generare delle **congestioni** sulla rete rilevante; la risoluzione delle congestioni in fase di programmazione viene gestita attraverso l’approvvigionamento nel MSD, da parte del gestore di rete, di risorse fornite da unità abilitate a *salire* (a *scendere*) che si rendono disponibili a modificare in incremento (in diminuzione) i propri *programmi aggiornati cumulati*.

Per essere abilitate, le UP:

- non devono essere alimentate da fonti rinnovabili non programmabili;

- possono variare la propria immissione, in aumento o decremento, di almeno 10 MW entro 15 minuti;

Gli UdD delle UP abilitate hanno l'obbligo di presentare offerta sul MSD; a fronte di documentati limiti tecnici di funzionamento della propria UP, l'UdD può però richiedere l'esenzione dall'abilitazione alla fornitura delle risorse per la risoluzione delle congestioni in fase di programmazione.

2.3.2 Regolazione primaria di frequenza e riserva primaria

In un sistema elettrico, ogni squilibrio tra generazione e fabbisogno in potenza causa un transitorio in cui, nei primi istanti, si verifica una variazione dell'energia cinetica immagazzinata nei motori e negli alternatori connessi e in esercizio. L'effetto evidente è una variazione di frequenza rispetto al valore nominale. Nei secondi successivi alla variazione di frequenza, i *regolatori di velocità* delle unità di produzione agiscono automaticamente, ed in maniera autonoma l'uno dall'altro, sulla potenza generata dai rispettivi motori primi ad essi asserviti con una azione che modifica la potenza elettrica in modo da ristabilire l'equilibrio tra la potenza generata ed il fabbisogno. Una volta ristabilito questo equilibrio, il sistema elettrico torna ad operare nella condizione di regime ma ad una frequenza diversa da quella nominale.

Ciò premesso, si definisce **regolazione primaria** della velocità l'insieme di operazioni avente l'obiettivo di mantenere nel sistema elettrico europeo interconnesso l'equilibrio istantaneo tra generazione e fabbisogno. Affinché ciò sia possibile è necessario che tali unità dispongano di un margine di potenza rispetto al punto di funzionamento, sia in incremento che in decremento. Questa potenza è denominata **riserva di regolazione primaria** o *banda di regolazione primaria*. La somma delle riserve di regolazione primarie di tutte le unità di produzione in esercizio costituisce la riserva primaria del Sistema Elettrico Nazionale. La riserva primaria di potenza deve essere continuamente disponibile e distribuita il più uniformemente possibile all'interno del Sistema Elettrico Nazionale.

2. Sistema elettrico nazionale

Il regolatore di velocità di cui deve essere dotato ogni UP che partecipa alla regolazione primaria di frequenza, deve essere in grado di garantire un funzionamento stabile del gruppo di generazione, sia nell'esercizio in parallelo con la Rete che in condizioni di rete isolata.

I regolatori devono garantire le seguenti prestazioni funzionali minime:

- precisione della misura di velocità migliore dello 0,02% in qualsiasi condizione di funzionamento;
- insensibilità del regolatore di velocità non superiore a ± 10 mHz;
- capacità di far funzionare l'UP in modo stabile a tempo indefinito, con qualunque grado di statismo compreso tra 2 e 8%, per qualunque punto di lavoro corrispondente ad un valore di frequenza compreso fra 47,5 Hz e 51,5 Hz, e con qualunque carico compreso fra il minimo tecnico e la potenza massima generabile dal gruppo.

La partecipazione alla regolazione primaria è obbligatoria e fornita esclusivamente dalle unità di produzione (UP) in servizio con potenza non inferiore a **10 MW**, ad eccezione di quelle alimentate da fonti rinnovabili non programmabili. Queste UP devono garantire una *riserva di potenza attiva non inferiore a 1,5%* (vedi Figura 2.6) della potenza efficiente dichiarata nel RUP (Registro Unità di Produzione).

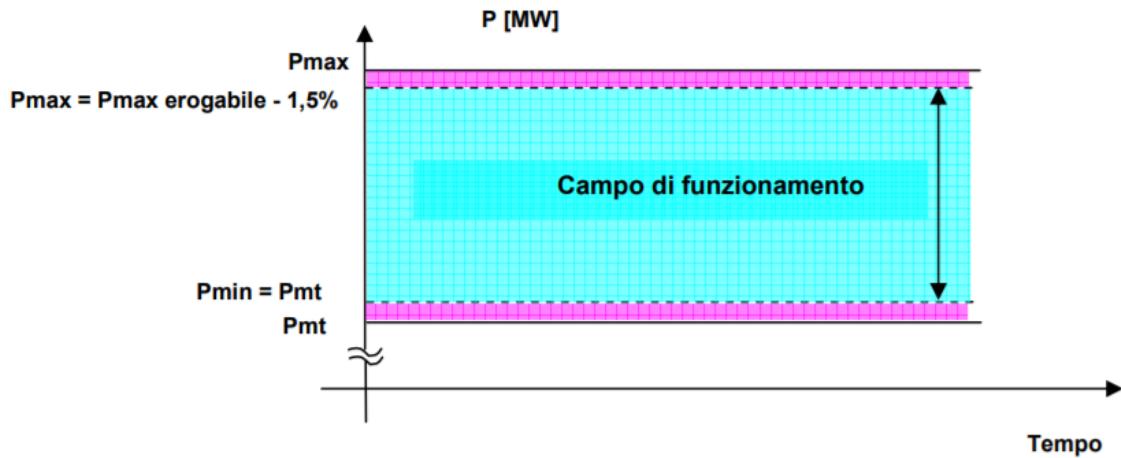


Figura 2.6: Campo di funzionamento ammissibile per le UP [9]

Come raffigurato sopra, il campo di funzionamento ammissibile dell'UP è rappresentato dall'area azzurra, ossia va dal valore di potenza di minimo tecnico + 1,5% al valore di potenza massima dichiarata – 1,5%.

Nei sistemi elettrici della Sardegna e della Sicilia (in quest'ultimo caso solo quando non è interconnessa al continente) ciascuna UP deve mettere a disposizione una riserva primaria non inferiore al $\pm 10\%$ della propria potenza efficiente P_{eff} (definita nel sotto-paragrafo successivo); di conseguenza potrà essere fornita una potenza attiva massima non superiore al 90% della P_{eff} e non inferiore al 10% della P_{eff} . [6] [9]

Per l'ammissione da parte di Terna al meccanismo di *remunerazione* per l'energia erogata, deve essere installato presso gli impianti di produzione un'apparecchiatura denominata UVRP (*Unità per la Verifica della Regolazione Primaria*), per il controllo e la valorizzazione del servizio fornito per la regolazione primaria di frequenza. [10]

2.3.2.1 Parametri utili

Si definisce **potenza efficiente** P_{eff} la potenza attiva massima che l'UP può produrre con continuità per un determinato numero di ore; per le turbine a gas essa è riferita alle condizioni ISO (International Standards Organization), ossia [9]:

- temperatura ambiente aria pari a 15 °C;
- pressione 1,013 bar;
- umidità relativa 60%.

Si definisce **statismo di un'UP** il rapporto tra la variazione della frequenza Δf , espressa in ‘per unità’ della frequenza nominale (50 Hz), e la corrispondente variazione della potenza elettrica ΔP_e , espressa in ‘per unità’ della potenza efficiente P_{eff} del gruppo, determinata in seguito all’azione del regolatore di velocità.

Si definisce **grado di statismo permanente** σ_P il valore ottenuto dalla seguente equazione:

$$\sigma_p = -\frac{\frac{\Delta f}{50}}{\frac{\Delta P_e}{P_{\text{eff}}}} \times 100 \quad (1)$$

Generalmente TERNA prescrive regolatori di velocità tarati con un grado di statismo pari al 4 - 5 %. [9]

Si definisce **banda morta** l'intervallo di frequenza, centrato attorno al valore nominale della frequenza di rete, entro il quale il regolatore di velocità non interviene; essa non è generalmente superiore a ± 10 mHz o ± 20 mHz. [9]

In caso di variazione di frequenza superiore alla banda morta il contributo non fornito in regolazione primaria dovrà essere recuperato (vedi Figura 2.7).

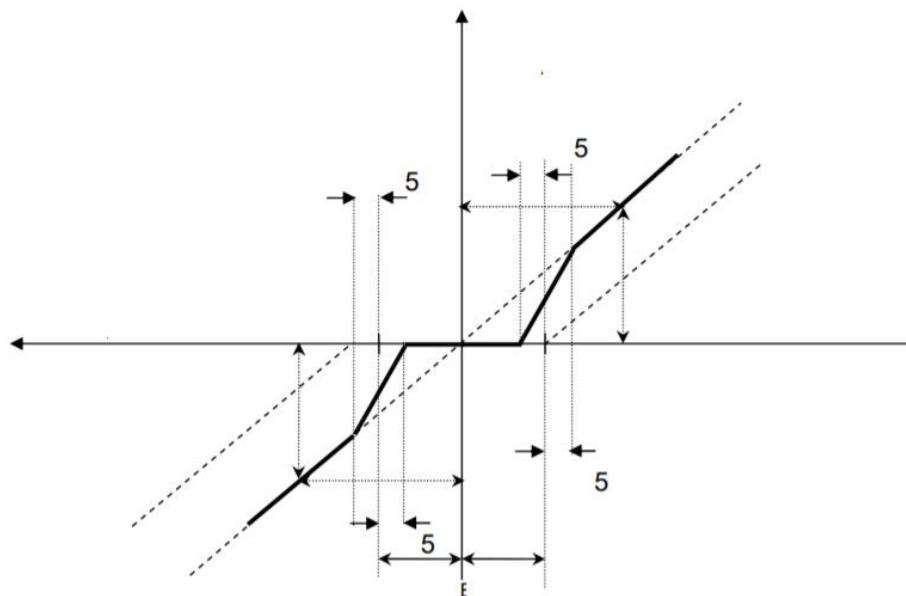


Figura 2.7: Esempio di modalità corretta di regolazione per la compensazione della banda morta dei regolatori

Si definisce **energia regolante** di un'UP il rapporto tra la variazione di potenza elettrica erogata dall'UP e la variazione di frequenza:

$$K_R = -\frac{\Delta P_e}{\Delta f} = \frac{1}{\sigma_P} \cdot \frac{P_{eff}}{50} \quad (2)$$

Viene generalmente espresso in termini di $\left[\frac{MW}{Hz} \right]$. La somma dei contributi delle energie regolanti definisce l'***energia regolante del sistema elettrico***. [9]

2.3.2.2 Condizioni normali di esercizio e di emergenza

Le **condizioni normali** di esercizio si verificano quando la frequenza di rete rimane contenuta nell'intervallo ± 100 mHz rispetto al valore nominale, con esclusione della Sardegna e della Sicilia (quest'ultima se non connessa alla rete continentale) dove la frequenza è nell'intervallo $49,5 \div 50,5$ Hz.

Per potenze generate comprese tra la potenza massima e minima erogabili, ogni UP deve erogare una quota ΔP_e della banda di riserva primaria disponibile, tenendo conto dell'entità della variazione di frequenza Δf e del grado di statismo permanente σ_P impostato nel regolatore. Il valore ΔP_e segue la seguente relazione:

$$\Delta P_e = -\frac{\Delta f}{50} \cdot \frac{P_{eff}}{\sigma_P} \cdot 100 \quad (3)$$

Le modalità di erogazione del contributo di regolazione primaria devono rispettare le seguenti prescrizioni:

- entro 15 secondi dall'inizio della variazione di frequenza deve essere erogata almeno metà della ΔP_e richiesta;
- entro 30 secondi dall'inizio della variazione di frequenza deve essere erogata tutta la ΔP_e richiesta.

Qualora lo scarto di frequenza dovesse persistere anche dopo essere trascorsi 30 secondi dall'inizio della variazione di frequenza, tutte le UP regolanti dovranno continuare ad aumentare, o diminuire, la potenza erogata in funzione dell'errore di frequenza; inoltre una volta che la potenza richiesta dalla regolazione primaria è stata erogata, l'UP dovrà essere in grado di continuare ad erogare stabilmente il nuovo valore di potenza risultante per almeno 15 minuti. [9]

2. Sistema elettrico nazionale

In **condizioni di emergenza** la frequenza può variare tra 47,5 Hz e 51,5 Hz e ogni UP deve essere in grado di erogare tutto il margine di potenza disponibile fino al raggiungimento di uno dei limiti operativi di massima o minima potenza dichiarati nel RUP per quell’impianto.

L’erogazione dovrà avvenire con il massimo gradiente tollerabile per il funzionamento continuativo dell’impianto, ossia significativamente superiore al 3% al minuto della P_{eff} dell’unità di produzione. [9]

2.3.3 Regolazione secondaria di frequenza e riserva secondaria

Per ristabilire sia il valore nominale della frequenza sia i valori di potenza di scambio programmati, è stata istituita una ulteriore regolazione, denominata **Regolazione Secondaria** o *Regolazione Frequenza-Potenza*, che deve intervenire con tempi più lenti, dell’ordine delle diverse decine di secondi.

La regolazione secondaria, come quella primaria, agisce su un margine di potenza dedicata denominata **riserva o banda secondaria**, resa disponibile dalle unità di produzione abilitate alla fornitura del servizio di regolazione secondaria e la cui entità è stabilita da TERNA.

La regolazione secondaria è effettuata dai regolatori di velocità delle unità di produzione che partecipano a tale servizio, mediante l’acquisizione e l’elaborazione di un segnale aggiuntivo, denominato *segnale di livello*, inviato da un dispositivo automatico centralizzato, il **Regolatore di Rete**, sensibile all’errore di frequenza Δf e all’errore della potenza programmata di scambio ΔP_s tra Aree di Controllo. I regolatori di velocità che acquisiscono questo segnale, modificano la richiesta di carico, adeguando la potenza erogata dalle UP in modo coerente all’annullamento di Δf e ΔP_s (entro comunque il limite di riserva di regolazione secondaria disponibile).

Il servizio di regolazione secondaria è facoltativo e retribuito. Il Gestore della rete si approvvigiona delle risorse per la riserva secondaria per il tramite del Mercato dei Servizi del Dispacciamento (MSD). [6] [9]

Le UP che partecipano alla regolazione secondaria devono rendere disponibile una riserva di regolazione totale data dalla somma della riserva primaria e secondaria.

Il valore della riserva secondaria di potenza:

- per le UP termoelettriche non deve essere inferiore al $\pm 6\%$ della potenza massima;
- per le UP idroelettriche vale il $\pm 15\%$ della potenza massima.

Per l'erogazione della riserva secondaria, le UP devono essere in grado di fornire la variazione massima della banda di regolazione in 200 s. (100 s per la Sardegna e, se non collegata alla rete continentale, anche per la Sicilia) e per un tempo massimo non inferiore a 2 ore. [9]

2.3.4 Regolazione terziaria di frequenza e riserva terziaria

Nel caso di utilizzo permanente della banda di regolazione secondaria, TERNA può ripristinare una quota del margine di potenza destinato a questa regolazione utilizzando un ulteriore potenza disponibile (con l'entrata in servizio di UP di riserva o la variazione della potenza prodotta da UP già in servizio) definita **Riserva di Regolazione Terziaria**.

Le UP abilitate a fornire risorse per la riserva terziaria di potenza sono abilitate anche a fornire riserva secondaria di potenza.

La regolazione terziaria di frequenza non è automatica; il servizio è facoltativo e retribuito.

La *riserva terziaria* viene predisposta durante la fase di programmazione o nella fase di gestione in tempo reale, tramite l'invio di ordini di dispacciamento, nel contesto del servizio di bilanciamento; non avviene quindi per mezzo di meccanismi di regolazione automatica, come nel caso della riserva primaria e secondaria di potenza.

La *riserva terziaria* di potenza si articola nella modalità:

- “a salire”: la presenza di margini nei programmi in esito a MSD consentono in tempo reale l'aumento dell'immissione o la riduzione del prelievo di energia elettrica da parte di una UP abilitata, nei tempi definiti dal Gestore della rete;

2. Sistema elettrico nazionale

- “a scendere”: la presenza di margini nei programmi in esito a MSD consentono in tempo reale la riduzione dell’immissione o l’aumento del prelievo di energia elettrica da parte di una UP abilitata nei tempi definiti dal Gestore della rete.

I *margini di riserva terziaria* di potenza *a salire* (*a scendere*) devono essere costituiti nei programmi in esito al MSD e sono pari all’incremento di immissione o al decremento di prelievo (all’incremento di prelievo o al decremento di immissione) che può essere effettuato:

- entro 15 minuti dalla richiesta del Gestore della rete: si parla di *Riserva Pronta* *a salire* (*a scendere*); essa ha lo scopo di ricostituire la *banda di riserva secondaria* di potenza entro i tempi previsti dalla normativa ENTSO-E (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*) e di mantenere il bilancio di sistema in caso di variazioni rapide di fabbisogno;
- entro 15 minuti dalla richiesta del Gestore della rete e che può essere sostenuto per almeno 120 minuti: si parla di *Riserva Rotante* *a salire* (*a scendere*); essa ha lo scopo di ricostituire la banda di *riserva secondaria* di potenza e la *riserva terziaria pronta*;
- entro 120 minuti dalla richiesta del Gestore della rete e che può essere sostenuto senza limitazioni di tempo: si parla di *Riserva di Sostituzione* *a salire* (*a scendere*); Questa riserva ha lo scopo di ricostituire la *riserva terziaria rotante*.

Le UP abilitate a fornire risorse per il *bilanciamento* sono anche abilitate a fornire *riserva terziaria* di potenza nella modalità *a salire* (*a scendere*) qualora siano in grado di variare, in incremento (decremento), la propria immissione di almeno 10 MW dall’arrivo di un ordine di dispacciamento e, limitatamente alla *riserva pronta*, con un gradiente almeno pari a 50 MW/min.

Gli UdD delle UP abilitati alla fornitura di risorse per la riserva terziaria di potenza devono installare presso il punto di controllo fisico dell’UP i dispositivi atti a ricevere gli ordini di dispacciamento e un sistema di comunicazione telefonico.

Sono escluse dalla fornitura del servizio di riserva terziaria di potenza le UP alimentate da fonti rinnovabili non programmabili, in quanto non in grado di modulare efficacemente e prevedibilmente la propria produzione. [6]

2.3.5 Servizio di Bilanciamento

Il Gestore della rete utilizza le risorse per il bilanciamento per svolgere un servizio in tempo reale che ha lo scopo di:

- assicurare il mantenimento dell'equilibrio tra le immissioni ed i prelievi di energia elettrica;
- risolvere le congestioni di rete;
- ripristinare i corretti margini di riserva secondaria di potenza;
- attivare le risorse approvvigionate per la riserva terziaria di potenza;
- accettare le offerte delle UP abilitate al bilanciamento presentate sul MSD.

Esistono due modalità di servizio di bilanciamento: a *salire* e a *scendere*. La fornitura di risorse da parte degli UdD (Utenti del Dispacciamento) per svolgere il servizio di bilanciamento a *salire* (*a scendere*) significa incrementare (ridurre) la propria immissione o ridurre (incrementare) il prelievo rispetto ai programmi vincolanti in potenza.

Le UP rilevanti abilitate alla fornitura del servizio di bilanciamento, come per la regolazione terziaria, devono:

- non essere alimentate da fonti rinnovabili non programmabili;
- essere in grado di iniziare a variare, in aumento o in decremento, la propria immissione entro 5 minuti dall'arrivo di un *ordine di dispacciamento* e di variare di almeno 3 MW entro 15 minuti (condizione meno restrittiva rispetto a quella di riserva terziaria per poter consentire l'utilizzo di ulteriori risorse in tempo reale)
- poter sempre eseguire in qualsiasi momento della giornata ordini di dispacciamento.

2. Sistema elettrico nazionale

Il Gestore della rete si approvvigiona delle risorse per il bilanciamento partecipando al Mercato dei Servizi di Dispacciamento.

Gli UdD hanno l'obbligo di rendere completamente disponibile al Gestore della rete l'utilizzo dei margini residui rispetto alla potenza massima e all'azzeramento dell'immissione. [6]

2.3.6 Servizio di interrompibilità del carico

Quando le risorse approvvigionate sul MSD non sono sufficienti al mantenimento della sicurezza di funzionamento, il Gestore della rete ricorre all'utilizzo del *servizio di interrompibilità*, ossia i clienti finali titolari di carichi interrompibili si rendono disponibili a garantire il distacco di un'utenza in un tempo inferiore ai 200 ms dalla ricezione del telesegnale. L'interruzione del carico non dovrà inoltre comportare alcun rischio all'ambiente e agli impianti produttivi.

Il cliente finale a cui è assegnato il servizio di interrompibilità è tenuto a stipulare un contratto con il Gestore della rete al fine di regolarne il servizio. [6]

2.3.7 Regolazione primaria e secondaria di tensione

La **regolazione di tensione** è l'insieme delle attività necessarie al contenimento, entro i limiti prefissati, delle variazioni di tensione nei nodi della RTN al fine di garantire il corretto funzionamento degli apparecchi.

Partecipano alla regolazione di tensione i seguenti componenti di impianto:

- gruppi di produzione;
- trasformatori e autotrasformatori;
- condensatori di rifasamento e reattanze di compensazione trasversali.

Anche gli impianti utilizzatori direttamente connessi alla RTN sono tenuti a contribuire alla regolazione della tensione, adottando provvedimenti per mantenere il fattore di potenza all'interno di un opportuno range di valori.

Le tensioni nei nodi della RTN sono determinate essenzialmente dai transiti di potenza reattiva sulle linee che la compongono, a causa della natura prevalentemente reattiva delle stesse (tipicamente il rapporto fra resistenza e reattanza è pari a 1/10).

Per regolare la tensione nei nodi della macchina, ogni gruppo di produzione è dotato di un RAT (*Regolatore Automatico di Tensione*) che interviene sul sistema di eccitazione del gruppo, variando così la produzione (o l'assorbimento) di potenza reattiva.

La **regolazione primaria di tensione** consiste nella regolazione della tensione ai morsetti dei gruppi di generazione.

Il valore della tensione di riferimento (valore di *set point*) viene impostato manualmente sul RAT del gruppo, seguendo le indicazioni del Gestore della RTN. Nell'attuare tale valore il RAT tiene conto di alcuni segnali correttori, ottenibili tramite opportuni collegamenti di TA (Trasformatore di corrente) e di TV (Trasformatore di tensione), comprendenti:

- Un segnale di *compound*, proporzionale alla potenza reattiva erogata dal gruppo; serve a compensare parzialmente le cadute di tensione che si generano ai capi del trasformatore elevatore e sulle linee di trasmissione, così da mantenere una tensione circa costante ai capi del carico;
- Un segnale dal PSS (dispositivo *Power System Stabilizer*), funzione della potenza elettrica del gruppo: serve a smorzare le oscillazioni elettromeccaniche del rotore, causate da fenomeni transitori. [11]

La fornitura di risorse per il servizio di *riserva reattiva* per la **regolazione primaria di tensione di gruppo (di centrale)** di generazione consiste nell'asservire la produzione di potenza reattiva di un *gruppo di generazione* (di *gruppi di generazione* appartenenti ad una *centrale*) ad un dispositivo automatico di regolazione in grado di modulare la potenza reattiva erogata sulla base dello scostamento della tensione ai *morsetti* (sulle *sbarre AT della centrale*) rispetto ad un valore di riferimento; gli UdD hanno la *facoltà (l'obbligo)* di fornire

2. Sistema elettrico nazionale

tali risorse nel caso in cui la potenza nominale sia *inferiore a 10 MVA (superiore a 100 MVA)*.

Ciascuna centrale deve essere dotata di un SART (Sistema Autonomo per la Regolazione della Tensione). [6]

La **regolazione secondaria di tensione** consiste nella regolazione centralizzata della tensione di alcuni nodi di rete, denominati “*nodi pilota*” che, per loro caratteristiche di connessione, hanno una importante influenza sulle tensioni di una vasta area della rete elettrica.

Questa regolazione è svolta da un Regolatore Regionale di Tensione (RRT), che agisce su un certo numero di stazioni e centrali che insieme vanno a costituire un’area denominata “regione”; ogni centrale è dotata di un (SART) che agisce modificando i *set point* dei RAT dei singoli gruppi di centrale, i quali andranno ad erogare o ad assorbire una potenza reattiva pari alla telemisura ricevuta. [11] [12]

La fornitura di risorse per il servizio di *riserva reattiva* per la *regolazione secondaria di tensione* segue le medesime indicazioni date per la regolazione primaria di tensione di centrale con la sola differenza che la potenza reattiva è modulata sulla base dello scostamento della tensione su alcuni nodi predefiniti, chiamati *nodi pilota*. [6]

2.3.8 Rifiuto del carico

Il **rifiuto del carico** è un servizio che offre il gruppo di generazione a fronte della disconnessione del medesimo dalla rete e consiste nel continuare ad alimentare i propri servizi ausiliari al fine di mantenere condizioni di funzionamento stabili.

Sono obbligati a fornire tale servizio gli UdD titolari di UP termoelettriche comprendenti gruppi di generazione di potenza maggiore di 100 MW. [6]

2.3.9 Rialimentazione del sistema elettrico

La **partecipazione alla rialimentazione del SEN** (*Sistema Elettrico Nazionale*) consiste nella disponibilità di un gruppo di generazione a partecipare all'attuazione del PdR (Piano di Riaccensione), qualora si manifesti un *blackout*, ossia una totale assenza di tensione in impianti o porzioni di rete elettrica a seguito di disservizi.

Per l'idoneità a tale partecipazione, almeno uno tra i gruppi di generazione associati alla UP deve essere in grado di:

- effettuare un avviamento autonomo in assenza di alimentazione esterna;
- rimanere in funzionamento stabile senza essere connesso alla rete, alimentando i propri servizi ausiliari per un tempo pari ad almeno 12 ore.

Le unità operative a cui spetta il compito di riprendere il normale servizio elettrico devono attuare una serie di azioni coordinate fra loro. È possibile suddividere cronologicamente queste azioni nelle seguenti due fasi operative:

1. *Riaccensione*: viene constata la condizione di blackout e ripresa la generazione tramite la riconnessione dei generatori;
2. *Ripresa del carico*: costituita da una fase di *risincronizzazione* nella quale le isole elettriche vengono connesse fra loro per ricostituire un sistema elettrico interconnesso e una fase di ripresa completa del carico nella quale vengono progressivamente rialimentati tutti i carichi.

Gli UdD le cui UP sono indicate nel PdR hanno l'obbligo di prestare il servizio di rialimentazione del SEN; in caso di documentata impossibilità tecnica possono però richiedere una deroga. [6] [13]

2.3.10 Disponibilità al telescatto

Un sistema elettrico si trova in uno statuto di funzionamento normale quando soddisfa il criterio di sicurezza N-1 ossia tutte le variabili elettriche che ne definiscono lo stato di

2. Sistema elettrico nazionale

funzionamento si trovano nei limiti predefiniti e la mancanza di un singolo componente non causerebbe la violazione di questo limite.

È possibile che si verifichino una serie di eventi in rapida successione e incontrollabili che portino alla violazione del limite di funzionamento del sistema elettrico; al fine di prevenire gli effetti di tali eventi sono state definite delle procedure di sicurezza attraverso il “Piano di difesa” del sistema elettrico italiano; uno dei servizi forniti è la **disponibilità all'utilizzo del telescatto**. Esso è offerto dal titolare di una UP e consistente nel dotare la propria unità di un dispositivo automatico che la disconnette immediatamente dalla rete al verificarsi di un determinato evento (tempi di attuazione inferiori al secondo).

Le UP abilitate alla fornitura del servizio di telescatto, devono essere abilitate anche al servizio di bilanciamento; per gli UdD delle UP localizzate nei poli di produzione limitata, il servizio di telescatto è obbligatorio. [6] [14]

2.4 Revisione della regolazione del dispacciamento

Nell’odierno contesto in rapida e continua evoluzione per effetto della diffusione delle fonti rinnovabili non programmabili e della generazione distribuita, nonché del progressivo venir meno degli impianti programmabili che hanno storicamente reso disponibili le risorse per garantire l’equilibrio in tempo reale tra domanda e offerta di energia elettrica, è necessario individuare le principali linee di intervento volte a rendere l’attività di dispacciamento idonea a garantire efficientemente la sicurezza del sistema elettrico. [15]

L’Autorità, con la deliberazione **393/2015/R/eel**, ha avviato un procedimento finalizzato alla formazione di provvedimenti per la riforma organica della regolazione del servizio di dispacciamento fino a pervenire al nuovo Testo Integrato del Dispacciamento Elettrico (TIDE), in coerenza con la normativa europea e nello specifico i regolamenti europei sul bilanciamento elettrico EB GL (*Electricity Balancing Guideline*) e sull’esercizio del sistema elettrico CACM (*Capacity Allocation and Congestion Management*). [16]

2.4.1 TIDE

La riforma della regolazione del servizio di dispacciamento è un tema di estrema attualità su cui si continua a lavorare. L’Autorità di regolazione per energia reti e ambiente (ARERA) ha pubblicato lo scorso 25 luglio 2019 il documento di consultazione 322/2019/R/eel sul nuovo **Testo Integrato del Dispacciamento Elettrico** (TIDE), contenente alcune disposizioni per migliorare il regolamento MSD tenendo conto del peso sempre maggiore di fonti rinnovabili non programmabili e generazione distribuita.

“Questo Testo Integrato” spiega il presidente di ARERA, Stefano Besseghini. “assume un ruolo centrale e rilevante proprio nella capacità di includere strutturalmente nel sistema elettrico fenomeni in forte crescita come la generazione da fonti rinnovabili, la generazione distribuita o la mobilità elettrica consegnandoci una visione future proof del sistema elettrico”. [17]

Il Testo Integrato del Dispacciamento Elettrico si pone l’obiettivo di:

- definire i criteri con cui Terna procederà alla revisione dei prodotti oggetto di negoziazione su MSD e delle modalità di approvvigionamento delle risorse flessibili, preservando, laddove possibile, l’impostazione *Central Dispatch System*;
- rivedere la classificazione delle unità di produzione e di consumo, superando il concetto di rilevanza attualmente utilizzato per identificare in modo distinto le unità che devono partecipare singolarmente ai mercati e le unità che possono essere aggregate;
- consolidare le modalità tramite le quali le unità di consumo e le unità di produzione precedentemente escluse (fonti rinnovabili non programmabili, generazione distribuita), compresi accumuli e veicoli elettrici, potranno fornire risorse per il dispacciamento, anche tramite efficaci forme di aggregazione, nonché le modalità con cui esse vengono remunerate, fermo restando il principio della neutralità tecnologica e garantendo che non vi siano barriere tali da impedire l’utilizzo di tutte le risorse disponibili ove economicamente convenienti;
- valorizzare gli sbilanciamenti nel modo più coerente possibile con le dimensioni temporale, spaziale e merceologica che contraddistinguono il valore dell’energia in tempo reale, evitando che eventuali distorsioni nella formazione dei prezzi di sbilanciamento

2. Sistema elettrico nazionale

determinino esiti inefficienti del mercato con conseguenti possibili ricadute negative anche sulla sicurezza del sistema elettrico e sui costi sostenuti per garantirla;

– analizzare e identificare i nuovi ruoli dei distributori di energia elettrica, nel contesto di una progressiva diffusione delle risorse distribuite di produzione ed accumulo e di una gestione sempre più “attiva” delle reti.

[15] [16] [18]

2.4.2 Progetti pilota

L’Autorità, con la **deliberazione 300/2017/R/eel**, ha dato inizio a una fase sperimentale per iniziare a consentire la partecipazione a MSD alle unità precedentemente escluse, tramite **progetti pilota** finalizzati alla raccolta di elementi utili per la riforma del dispacciamento e per rendere disponibili nuove risorse di dispacciamento fermo restando il principio della neutralità tecnologica, ossia che i progetti pilota non verranno differenziati sulla base delle fonti, delle tecnologie e delle tipologie delle unità di produzione o di consumo.

Attraverso questa delibera viene introdotta la figura del *Balance Service Provider* (BSP) o *aggregatore*, il soggetto responsabile per la partecipazione a MSD.

I **progetti pilota** istituiti sono, a tutti gli effetti, veri e propri regolamenti pilota, nel senso che non riguardano una sperimentazione limitata a un soggetto o a una tecnologia ma rappresentano una procedura sperimentale per consentire la partecipazione a MSD di unità di produzione e/o di consumo precedentemente non ammesse.

Tali progetti pilota sono individuati da Terna e successivamente inviati all’Autorità per l’approvazione e non riguardano le unità di consumo rientranti nel contratto di dispacciamento dell’Acquirente Unico. Essi possono riguardare:

- la partecipazione volontaria a MSD delle unità di produzione rilevanti a oggi non abilitate (inclusi i sistemi di accumulo che con la deliberazione 574/2014/R/eel sono stati equiparati alle unità di produzione). Esse in generale partecipano a MSD

singolarmente con riferimento allo stesso punto di dispacciamento valido per la partecipazione ai mercati dell’energia e per la valorizzazione degli sbilanciamenti effettivi. L’utente del dispacciamento titolare del punto di dispacciamento, sempre coincidente con il Balance Service Provider (BSP), è la controparte per la fornitura delle risorse di dispacciamento.

- la partecipazione volontaria a MSD delle unità di produzione e di consumo su base aggregata, costituendo le UVA (Unità Virtuali Abilitate), i cui perimetri geografici devono essere tali che la movimentazione delle unità dell’UVA non porti ad una violazione dei vincoli di rete, coerentemente con il modello di rete utilizzato dall’algoritmo per la selezione delle offerte accettate su MSD. Essi possono essere classificati in:
 - *Unità Virtuali Abilitate di Produzione (UVAP)*, costituite da sole unità di produzione non rilevanti, compresi i Sistemi di Accumulo (SdA);
 - *Unità Virtuali Abilitate di Consumo (UVAC)*, costituite da sole unità di consumo;
 - *Unità Virtuali Abilitate Miste (UVAM)*, costituite da UVAP, UVAC e/o unità di produzione rilevanti;
 - *Unità Virtuali Abilitate Nodali (UVAN)*, costituite da unità di produzione rilevanti e/o non rilevanti, ed eventualmente anche da unità di consumo, all’interno dello stesso nodo della rete di trasmissione nazionale; [16] [19]

2.4.2.1 UPR

Ai sensi della deliberazione 383/2018/R/eel, al decorrere dal 1° settembre 2018, le *unità di produzione rilevanti non oggetto di abilitazione obbligatoria*, denominate **UPR**, possono essere abilitate alla fornitura di risorse per:

- la risoluzione delle congestioni a programma;
- la riserva terziaria rotante e/o di sostituzione;
- il bilanciamento.

Ai fini della fornitura di risorse per la *risoluzione delle congestioni a programma*, possono richiedere l’abilitazione gli utenti del dispacciamento di unità di produzione che siano in

2. Sistema elettrico nazionale

grado di modulare (in aumento o decremento) la propria immissione di almeno 5 MW entro 15 minuti dalla ricezione della richiesta di dispacciamento.

Per la fornitura di risorse per la *riserva terziaria rotante*, l'unità di produzione deve essere in grado di modulare la propria immissione di almeno 5 MW entro 15 minuti dalla richiesta e mantenere la modulazione per almeno 2 ore consecutive.

Ai fini della fornitura della *riserva terziaria di sostituzione*, l'unità di produzione deve essere in grado di modulare la propria immissione di almeno 5 MW entro 2 ore dalla richiesta e sostenere la modulazione per almeno 8 ore.

Per la fornitura di risorse per il *bilanciamento*, l'unità di produzione deve essere in grado modulare la propria immissione di almeno 2 MW entro 15 minuti dalla ricezione dell'ordine di dispacciamento di Terna. [16]

La controparte per la fornitura delle risorse di dispacciamento è il BSP.

I servizi resi dalle UPR sono remunerati solo sulla base di un corrispettivo variabile pari al prezzo offerto dal BSP, definito in esito ad un'asta al ribasso del tipo “pay as bid”, applicato solamente in caso di attivazione delle risorse su MSD e limitatamente alle quantità accettate su detto mercato. In data 23 luglio 2019 risulta abilitata una sola UPR alimentata dalla fonte idrica (impianto idroelettrico a bacino), per la quale non è finora stata accettata nessuna offerta da Terna. [15]

2.4.2.2 UVAP

Il termine UVAP (*Unità Virtuali di Produzione*) definisce un aggregato di UP non rilevanti (programmabili o non programmabili) inclusi i sistemi di accumulo, inserite in contratti di dispacciamento diversi ma appartenenti ad un unico Utente del Dispacciamento (UdD), alla medesima zona e alla stessa tipologia; la controparte di Terna ai fini della fornitura delle risorse di dispacciamento è il BSP che può essere distinto dall'utente del dispacciamento. [16]

Il soggetto richiedente la creazione di un'UVAP può essere il titolare dei punti di immissione associati all'UVAP oppure un soggetto terzo aggregatore; a ciascuna UVAP, difatti, possono

essere associati uno o più punti di immissione, connessi in alta, media o bassa tensione, risiedenti nel medesimo perimetro di aggregazione e dotati di una apparecchiatura UPMG (*Unità Periferica di Monitoraggio Generazione*) in grado di rilevare e inviare verso Terna e verso un concentratore le misure della generazione con una periodicità di 4 secondi.

Una volta che il Richiedente comunica le unità di produzione non rilevanti che intende aggregare all'interno dell'UVAP, TERNA informa i Gestori di Rete competenti (qualora diversi da TERNA stessa) riguardo i punti di immissione che si trovano sulle loro reti elettriche e questi ultimi decidono se validare o meno le unità di produzione non rilevanti, con o senza limitazioni tecniche circa la loro capacità di modulare la potenza.

Il richiedente può presentare richiesta di abilitazione per la fornitura di risorse di dispacciamento nella modalità *a salire, a scendere* o in entrambe le modalità.

Il titolare dell'UVAP è tenuto ad aggiornare tempestivamente le informazioni dei punti di immissione associati all'UVAP; questi ultimi devono disporre di dati di misura orari e devono essere caratterizzati da un valore di PMC o “*Potenza Massima di Controllo*” (il valore massimo di potenza modulabile in immissione) e PmC o “*Potenza Minima di Controllo inferiore*” (il valore massimo di potenza modulabile in prelievo):

- non inferiori a 5 MW se abilitati sia nella modalità a salire che a scendere;
- non inferiore a 5 MW il PMC e non inferiore a 2 kW il PmC, se abilitati solo nella modalità a salire;
- non inferiore a -5 MW il PMC e non inferiore a -2 kW il PmC se abilitati solo nella modalità a scendere.

Devono essere inoltre in grado di modulare in incremento o in decremento l'immissione entro 15 minuti dalla ricezione dell'ordine di dispacciamento di TERNA e di sostenere tale modulazione per almeno 3 ore consecutive.

I soggetti titolari di UVAP, una volta che le richieste di qualificazione delle UVAP hanno avuto esito positivo, possono partecipare al MSD e fornire i seguenti servizi:

- a) **Riserva terziaria di potenza** *a salire* nella tipologia “riserva di sostituzione” e/o *a scendere*;
- b) **Bilanciamento** *a salire* e/o *a scendere*;

2. Sistema elettrico nazionale

- c) **Risoluzione delle congestioni** in *fase di programmazione*, nella modalità *a salire o a scendere*.

Per a) e c) nelle modalità *a salire*, la somma delle Potenze Modulabili in incremento dei punti di immissione alimentati da fonti programmabili non deve essere inferiore all'80% della somma delle Potenze Modulabili in incremento di tutti i punti di immissione.

Alle UVAP non si applica la disciplina degli sbilanciamenti.

Attraverso la piattaforma dinamica RUP dinamico di TERNA, il soggetto titolare dell'UVAP è tenuto a comunicare i dati tecnici per un qualsiasi periodo quartorario e della Baseline; egli deve inoltre definire un punto di controllo fisico ossia un punto continuamente presidiato nel quale poter installare un sistema di comunicazione telefonica e poter ricevere gli ordini di dispacciamento. I Dati tecnici validi sono quelli dichiarati entro un tempo minimo di preavviso di 30 minuti a partire dall'istante di comunicazione (nella *fase di gestione in tempo reale*) ed entro i tempi previsti per la fase di programmazione (nella *fase di programmazione di MSD*).

I soggetti titolari delle UVAP dovranno presentare le offerte (quantità, prezzo) per ciascun periodo orario sulla piattaforma informatica del GME; essi hanno l'obbligo di presentare un'offerta predefinita prima dell'inizio dell'operatività di ciascuna UVAP ma possono poi inserire quotidianamente un'offerta nel giorno precedente alla quale si riferiscono nella fase di programmazione di MSD o nel giorno corrente nella fase di bilanciamento (sessioni del MB).

Le UVAP non risulteranno abilitate alla presentazione di offerte per la *Riserva secondaria*, l'*Accensione ed il Cambio Assetto*, il *Minimo* e lo *Spegnimento*.

Le unità allocate nella fase di programmazione, qualora le esigenze di sicurezza e adeguatezza del sistema elettrico lo richiedessero, potranno già essere attivate nella medesima fase; l'accettazione delle riserve in un tempo il più possibile prossimo a quello reale, grazie alla rapidità di modulazione delle UVAP, permetterà comunque di massimizzare l'efficienza di gestione del sistema elettrico.

Il programma vincolante in ogni quarto d'ora viene calcolato come un quarto delle quantità accettate nella fase di programmazione nell'ora che include il quarto d'ora dato.

In seguito all'accettazione da parte di Terna delle quantità offerte, il soggetto titolare dell'UVAP dovrà darne esecuzione e rispetto alla propria Baseline modificare i valori di immissione dei punti di produzione. La remunerazione delle offerte accettate avverrà poi secondo le modalità previste per le UPA, indicate nelle Regole per il Dispacciamento. [20]

Ai sensi della deliberazione 583/2017/R/eel, a decorrere del 1° novembre 2017, le UVAP possono richiedere l'abilitazione alla fornitura della risoluzione delle congestioni a programma, della riserva terziaria di potenza e delle risorse per il bilanciamento (a salire o a scendere). Riportando alcuni dati statistici, le UVAP abilitate nei successivi 7 mesi a partire dal 1° novembre 2017 erano ubicate prevalentemente nella zona Nord e ognuna di esse era gestita da un BSP; la quasi totalità di UVAP qualificate era caratterizzata da sole unità di produzione idroelettriche e circa un terzo della potenza abilitata era riconducibile a unità di produzione alimentate da fonti rinnovabili non programmabili (idroelettrico fluente). Le UVAP movimentate durante il periodo di sperimentazione hanno mediamente fornito circa tre quarti della modulazione richiesta, garantendo quindi un buon grado di affidabilità. La quasi totalità del servizio fornito è stato nella modalità *a salire*. Le UVAP sono state movimentate solo in tempo reale.

2.4.2.3 UVAC

Si definisce **UVAC** (*Unità Virtuali Abilitate di Consumo*) un aggregato di unità di consumo inserite in contratti di dispacciamento diversi. Esse rilevano solamente per la partecipazione a MSD, mentre ai fini della partecipazione ai mercati dell'energia e, conseguentemente, ai fini della determinazione dei corrispettivi di sbilanciamento, le unità di carico incluse in tali tipologie di UVA continuano a rimanere inserite nei punti di dispacciamento per unità di consumo già oggi esistenti. [16]

In Figura 2.8 viene evidenziato come più UVAC possano far parte della stessa UC, ma un singolo UVAC non possa essere associata a più UC [21].

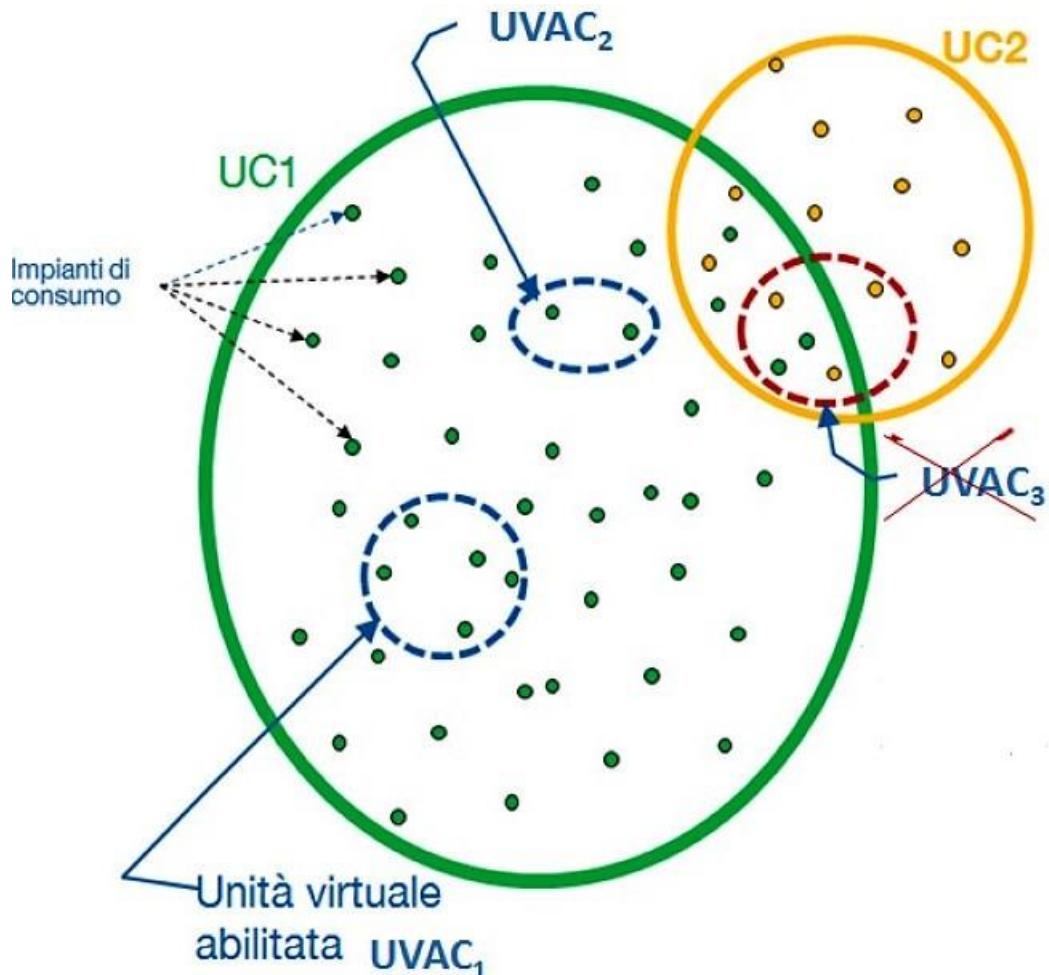


Figura 2.8: Relazione tra UC e UVAC [21]

La controparte per la fornitura delle risorse di dispacciamento è il BSP che può essere distinto dall’utente del dispacciamento; il BSP è quindi responsabile per il mancato rispetto degli ordini di dispacciamento. [16]

Il meccanismo di partecipazione finalizzato all’approvvigionamento di risorse di dispacciamento nell’ambito del MSD consiste in due fasi principali:

1. una fase di creazione e qualificazione dell’UVAC al MSD, nella quale vengono verificati i requisiti dei soggetti richiedenti la creazione di una UVAC e i requisiti tecnici minimi dell’UVAC;
2. una fase di presentazione delle offerte sul MSD, finalizzata all’attivazione delle risorse per il dispacciamento.

Il soggetto richiedente la creazione di un'UVAC può essere un soggetto terzo aggregatore o il titolare dei punti di prelievo associati all'UVAC; a ciascuna UVAC, infatti, possono essere associati uno o più punti di prelievo, connessi in alta, media o bassa tensione, risiedenti nel medesimo perimetro di aggregazione e dotati di una apparecchiatura UPMC (*Unità Periferica di Monitoraggio Carico*), in grado di rilevare e inviare le misure del consumo totale con periodicità di 4 secondi.

Ciascuna UVAC è caratterizzata da una *Potenza Massima di Controllo* (il valore massimo di potenza modulabile in immissione) non inferiore a 10 MW (a partire dal 22/07/2017 ridotto a **1 MW**) e deve essere in grado di modulare in incremento l'immissione (ossia in riduzione il prelievo) entro 15 minuti dalla ricezione dell'ordine di dispacciamento di Terna e sostenere tale incremento per almeno 3 ore consecutive nella fascia oraria 14.00 – 20.00 di tutti i giorni compresi tra lunedì e venerdì; è consentita una *banda di tolleranza* della potenza totale assorbita dalla UVAC durante la regolazione pari al 5% della potenza per la quale è stata richiesta la riduzione del carico da parte di Terna.

Il soggetto richiedente la creazione dell'UVAC dovrà richiedere l'accesso al portale informatico dedicato di Terna, attraverso il quale dovrà fornire la documentazione tecnica relativa a:

- dati identificativi di ciascun punto di prelievo associato all'UVAC;
- potenza disponibile di ciascun punto di prelievo associato all'UVAC;
- potenza modulabile di ciascun punto di prelievo associato all'UVAC, espressa in MW con tre cifre decimali.

Dovrà inoltre indicare l'Utente del Dispacciamento relativo a ciascun punto di prelievo e, in caso di variazioni, aggiornare tempestivamente tutte le informazioni fornite.

In seguito all'abilitazione al MSD, i soggetti titolari dell'UVAC possono partecipare al MSD e fornire i seguenti servizi:

- **Riserva terziaria di potenza** *a salire* nella tipologia “riserva di sostituzione” (vedi 2.3.4 Regolazione terziaria di frequenza e riserva terziaria);
- **Bilanciamento** (vedi 2.3.5 Servizio di Bilanciamento).

I soggetti titolari delle UVAC sono obbligati a definire un punto di controllo fisico ossia un punto continuamente presidiato nel quale poter ricevere gli ordini di dispacciamento e poter

2. Sistema elettrico nazionale

installare un sistema di comunicazione telefonica da utilizzare in caso di indisponibilità degli strumenti software forniti da Terna.

Attraverso la piattaforma dinamica RUP dinamico di Terna, il soggetto titolare dell'UVAC è tenuto a comunicare i dati tecnici per un qualsiasi periodo quartorario. I dati tecnici validi sono quelli dichiarati entro un tempo minimo di preavviso di 30 minuti a partire dall'istante di comunicazione (nella *fase di gestione in tempo reale*) ed entro i tempi previsti per la fase di programmazione¹ (nella *fase di programmazione di MSD*); qualora non fossero stati comunicati per un dato periodo quartorario, le unità verranno considerati indisponibili alla fornitura del servizio del dispacciamento per quel determinato quarto d'ora. Il soggetto titolare è tenuto comunque ad aggiornare i dati tecnici della UVAC al fine di risultare sempre fisicamente attuabile la richiesta di riduzione di prelievo da parte di TERNA.

TERNA si riserva di richiedere alla UVAC [21] di incrementare la propria immissione di una qualsiasi quantità compresa tra la propria potenza minima e la propria potenza massima, quest'ultima pari alla massima riduzione di prelievo resa disponibile a TERNA. A seguito della ricezione di ordini di dispacciamento, l'UVAC dovrà modulare in incremento la propria immissione (ossia fisicamente modulare in riduzione il prelievo) portandosi alla potenza minima dell'UVAC, per poi incrementare linearmente la propria immissione fino al raggiungimento della Potenza Massima dell'UVAC; un successivo ordine di dispacciamento determinerà una fase speculare a ritroso che riporterà alla fase iniziale del processo (vedi Figura 2.9).

¹ Apertura e chiusura della sessione MSD1 sono rispettivamente alle h.12.55 e alle h.17.30 del giorno antecedente il giorno di consegna.

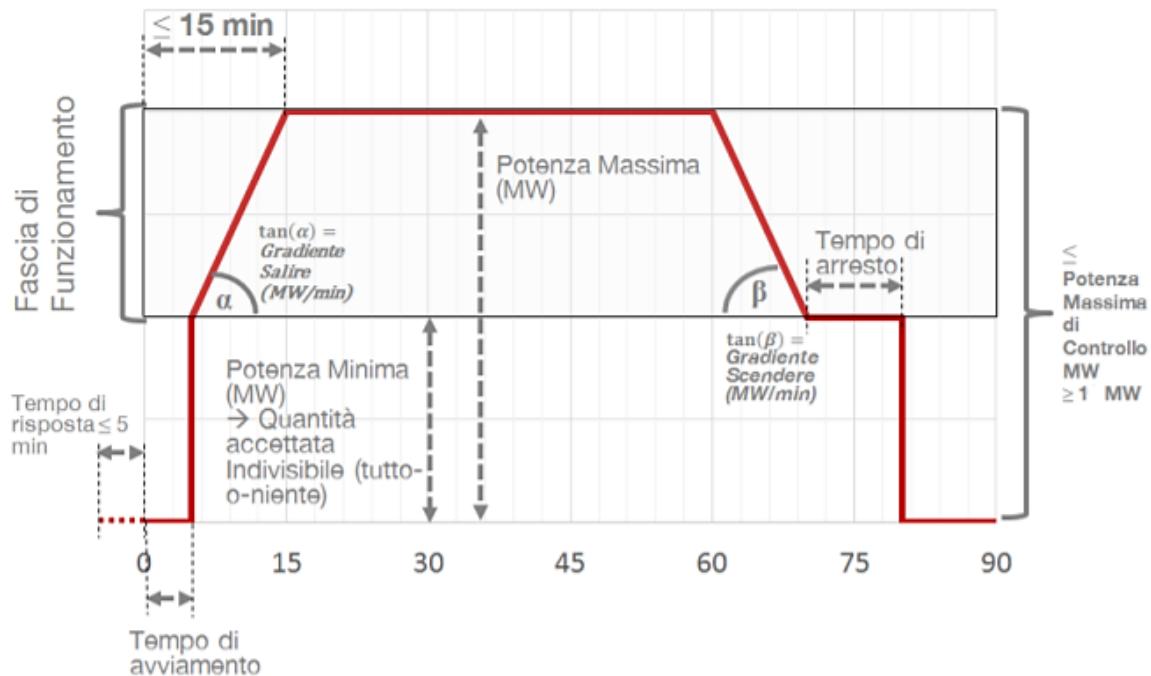


Figura 2.9: Profilo qualitativo variazione di potenza UVAC in seguito a ricezione ordine di dispacciamento

Al termine dell'ordine di dispacciamento, in realtà, l'UVAC non è obbligata a ripristinare il prelievo al valore antecedente l'ordine di dispacciamento e, pertanto, può variare liberamente i propri consumi.

I soggetti titolari delle UVAC hanno l'obbligo di presentare un'offerta predefinita prima dell'inizio dell'operatività di ciascuna UVAC (anche se potranno poi definirsi indisponibili alla fornitura dei servizi di dispacciamento), ma possono poi inserire quotidianamente una offerta durante la seduta di raccolta delle offerte MSD, nel giorno precedente a quello a cui le offerte si riferiscono nella fase di programmazione di MSD o nel giorno corrente nella fase di bilanciamento (sessioni del MB). L'offerta presentata consiste in un prezzo per l'incremento della immissione (corrispondente alla riduzione del prelievo) per ciascuna ora della giornata successiva per quanto riguarda la fase di programmazione e per ciascuna ora del blocco di quattro ore di ogni sessione MB per la fase di bilanciamento.

I soggetti titolari delle UVAC dovranno inoltre presentare per ciascun periodo orario e sulla piattaforma informatica del GME le seguenti offerte:

2. Sistema elettrico nazionale

- un prezzo per l'**offerta di Minimo**;
- una sola coppia (*quantità, prezzo*) **in vendita**, dove il prezzo corrisponde a quello per l'offerta di Minimo;
- un prezzo per l'**offerta di Spegnimento**, corrispondente al prezzo per l'offerta di Minimo;
- una sola coppia (*quantità, prezzo*) **in acquisto**, dove il prezzo corrisponde a quello per l'offerta di Minimo.

Ad eccezione del prezzo per l'offerta di Minimo, le altre offerte sono richieste esclusivamente per ragioni operative di compatibilità con le modalità di offerta delle UPA e non rilevano per la selezione delle offerte presentate dalle UVAC.

Le UVAC non risulteranno abilitate alla presentazione di offerte per la *Riserva secondaria*, l'*Accensione ed il Cambio Assetto* e la loro partecipazione al MSD e al MB è facoltativa.

Qualora vengano selezionate le offerte presentate per le UVAC su MSD, Terna allocherà riserva su tali unità per la fase di programmazione, mentre invierà in tempo reale ordini di dispacciamento al punto di controllo fisico dell'unità in fase di bilanciamento. [20]

La **remunerazione** per il servizio fornito comprende:

- una componente fissa, riconosciuta indipendentemente dall'attivazione delle risorse, definita in esito ad un'asta a ribasso di tipo “pay as bid” rispetto a una base di 30,000 [€/MW/anno];
- una componente variabile, riconosciuta con riferimento alle sole quantità accettate su MSD e solo in caso di attivazione delle risorse, che corrisponderà al prezzo offerto dal titolare dell'UVAC e dovrà essere in ogni caso non superiore allo “strike price”, imposto pari a 400 [€/MWh].

Per quanto riguarda il valore assunto dalla *componente fissa*, potrà essere inviata una sola offerta per l'asta a ribasso comprendente la potenza offerta dal titolare dell'UVAC in termini di potenza [MW] e il prezzo rappresentante il premio offerto in termini di [€/MW/anno]. Terna ordinerà le offerte ricevute in ordine crescente di premio offerto e selezionerà le offerte che rientrano nell'ordine di merito a concorrenza del valore disponibile per l'assegnazione. In caso di assegnazione, il premio di assegnazione sarà posto pari al premio offerto (criterio

“Pay as bid”). Per i progetti UVAC le assegnazioni della componente fissa sono stati quelli di seguito riportati [22]:

Periodo assegnazione	Prezzo medio pesato minimo [€/MW/anno]	Prezzo medio pesato massimo [€/MW/anno]
19 giugno – 30 settembre 2017	29,999	30,000
15 gennaio – 31 marzo 2018	29,999	30,000
18 giugno – 30 settembre 2018	29,818	29,974

Tabella 2.4: Assegnazioni d’asta per la componente fissa nei vari progetti pilota UVAC

Dai dati riportati in Tabella 2.4, si può notare che le assegnazioni delle aste riguardanti la componente fissa dei vari progetti pilota UVAC del 2017 e 2018 hanno sempre assunto un valore uguale o di poco inferiore al premio massimo disponibile.

La *componente fissa* viene valorizzata:

- su *base giornaliera* ed è pari al 100% quando il valore contrattualizzato viene rispettato per almeno 3 ore nella fascia tra le ore 14.00 e le ore 20.00, mentre è uguale a 0 quando non viene rispettato. Nel primo caso il suo valore è pari a $\frac{\text{Quota fissa}}{12 \cdot N_m}$ dove N_m è il numero di giorni compresi dal lunedì al venerdì del mese m ;
- su *base mensile* ed è pari al 100% quando l’impegno di offerta per almeno il 70% dei giorni di ogni mese viene rispettato, mentre è pari a 0 quando non viene rispettato.

Per quanto riguarda la *componente variabile*, il BSP, con riferimento a ciascuna UVAC e nel periodo di validità, si impegna a presentare offerte a salire per la riserva di sostituzione nella fase di programmazione del MSD e per il bilanciamento nella fase di bilanciamento del MSD (MB); nel caso in cui non formuli offerte per un quantitativo almeno pari alla quantità assegnata, TERNA non gli riconoscerà il corrispettivo fisso giornaliero.

Per ciascun periodo quartorario oggetto dell’ordine di dispacciamento, la remunerazione per le UVAC sarà pari al prodotto della quantità accettata (pari al valore medio nel quarto d’ora)

2. Sistema elettrico nazionale

per il prezzo di offerta (pari al prezzo indicato per la UVAC per il periodo orario che include il quarto d'ora in esame). Entro l'ultimo giorno del mese successivo a quello di competenza, TERNA determinerà e renderà disponibile al BSP i corrispettivi, il quale emetterà fattura ed entro il 17° giorno lavorativo del secondo mese successivo al mese di riferimento TERNA dovrà effettuare il pagamento.

Nei risultati ottenuti dal primo progetto pilota UVAC (19 giugno – 30 settembre 2017) la quasi totalità delle UVAC abilitate sono risultate essere localizzate in zona Nord e circa tre quarti delle quantità fornite sono state accettate, dimostrando un buon grado di affidabilità delle UVAC.

Le UVAC sono state movimentate solo in tempo reale e numerose di loro sono composte da unità di consumo per le quali le modulazioni dei prelievi di energia elettrica vengono gestite tramite la variazione interna di produzione, ossia che tali UVAC forniscono riserva a salire riducendo i prelievi di energia elettrica dalla rete, senza necessariamente ridurre i propri consumi interni che vengono coperti tramite un aumento della produzione in sito. [16]

2.4.2.4 UVAM

Si definisce **UVAM** (*Unità Virtuali Abilitate Miste*) l'aggregato caratterizzata dalla presenza sia di unità di produzione non rilevanti (siano esse programmabili o non programmabili) e/o unità di produzione rilevanti non obbligatoriamente abilitate che condividono il punto di connessione con unità di consumo, sia di unità di consumo. Rientrano anche i sistemi di accumulo, equiparati alle unità di produzione.

Le UVAM rilevano solamente per la partecipazione a MSD, mentre ai fini della partecipazione ai mercati dell'energia e alla determinazione dei corrispettivi di sbilanciamento le unità incluse in tali tipologie di UVA continuano a rimanere inserite nei punti di dispacciamento esistenti. La controparte per la fornitura delle risorse di dispacciamento è il BSP che può essere distinto dall'utente del dispacciamento. [16]

Le UVAM possono essere essenzialmente di due tipi:

- **UVAM-A**, caratterizzate dalla presenza di *unità di produzione non rilevanti*, di *unità di produzione rilevanti* non già obbligatoriamente abilitate che condividono il punto di connessione alla rete con una o più unità di consumo purché la potenza immessa al punto di connessione non sia superiore a 10 MVA, e di *unità di consumo*;
- **UVAM-B**, caratterizzate dalla presenza di *unità di produzione rilevanti* non già obbligatoriamente abilitate aventi potenza immessa al punto di connessione superiore a 10 MVA e *unità di consumo* che condividono il medesimo punto di connessione alla rete.

Il perimetro delle UVAM, all'interno del quale vengono aggregate unità di produzione e unità di consumo ai fini della partecipazione al MSD, è stato inizialmente definito da TERNA su base provinciale o regionale senza ancora tenere conto delle reali caratteristiche delle reti elettriche.

Le UVAM rilevano solamente per la partecipazione a MSD, mentre ai fini della programmazione e della determinazione dei corrispettivi di sbilanciamento, ogni unità di produzione o di consumo appartenente all'UVAM continua a rimanere inserita nei punti di dispacciamento esistenti.

Le UVAM sono caratterizzate da una capacità modulabile (a salire o a scendere) pari ad almeno 1 MW e possono essere abilitate alla fornitura di risorse (*a salire e/o a scendere*) per:

- la *risoluzione delle congestioni a programma*;
- la *riserva terziaria* (sia rotante, sia di sostituzione);
- il *bilanciamento*.

I requisiti di abilitazione ai fini della fornitura di risorse per la *risoluzione di congestioni a programma*, per la *riserva terziaria rotante* e per il *bilanciamento* consistono nella capacità di modulare, a salire (a scendere) il prelievo (l'immissione) entro 15 minuti dalla ricezione dell'ordine di dispacciamento di TERNA e sostenere tale modulazione per almeno 2 ore consecutive. Ai fini della fornitura di risorse per la *riserva terziaria di sostituzione*, invece, l'UVAM deve essere in grado di variare il proprio prelievo o la propria immissione entro 120 minuti dalla richiesta e sostenere la modulazione per almeno 8 ore consecutive.

2. Sistema elettrico nazionale

I servizi resi dalle UVAM possono essere remunerati secondo una delle seguenti modalità:

- sulla base di un corrispettivo variabile pari al prezzo offerto dal BSP, ottenuto in seguito ad un'asta a ribasso del tipo “pay as bid” applicato solamente in caso di attivazione delle risorse su MSD e limitatamente alle quantità accettate su tale mercato;
- tramite la fornitura a termine delle risorse, offrendo a salire per il bilanciamento per almeno 2 ore consecutive nella fascia tra le ore 14.00 e le ore 20.00 di tutti i giorni dal lunedì al venerdì. Vengono percepiti due corrispettivi: uno fisso e uno variabile; il corrispettivo fisso viene definito in esito ad un'asta al ribasso del tipo “pay as bid” rispetto a un valore massimo variabile da 15.000 €/MW/anno (per 2 ore di disponibilità) a 30.000 €/MW/anno (per 4 ore di disponibilità), erogato su base giornaliera; il corrispettivo variabile è pari al prezzo offerto dal titolare dell'UVAM nel MSD (con uno *strike price* di 400 €/MWh) e viene riconosciuto solamente in caso di attivazione delle risorse su MSD e limitatamente alle quantità accettate.

Il progetto pilota relativo alla partecipazione a MSD delle UVAM ha tenuto conto dei primi risultati derivanti dall'implementazione dei progetti pilota relativi rispettivamente alle UVAC e alle UVAP, armonizzandoli.

I primi risultati (progetto pilota relativo al periodo 1° novembre 2018 – 30 aprile 2019) hanno mostrato che la maggior parte delle UVAM sono per lo più costituite da:

- unità di consumo in grado di modulare i propri prelievi di energia elettrica tramite la variazione interna di produzione, ossia che forniscono il servizio di riserva a salire senza necessariamente ridurre i propri consumi interni, i quali verrebbero coperti da un aumento della produzione in sito;
- unità di produzione programmabili, quali ad esempio quelle di cogenerazione oppure quelle alimentate da combustibili rinnovabili;
- unità di produzione non programmabili che presentano però margini di flessibilità, quali ad esempio unità idroelettriche ad acqua fluente.

Le UVAM sono localizzate prevalentemente nella zona Nord e sono state utilizzate esclusivamente per fornire il servizio di bilanciamento *a salire* in tempo reale, offrendo un buon grado di affidabilità.

Le offerte selezionate da Terna hanno rappresentato poco più del 5% del totale delle offerte presentate. [15]

2.4.2.5 UVAN

Si definisce **UVAN** (*Unità Virtuali Abilitate Nodali*), l'aggregato caratterizzato dalla presenza di unità di produzione (programmabili o non programmabili) non oggetto di abilitazione obbligatoria ed eventualmente anche di unità di consumo, sottese allo stesso nodo della rete di trasmissione nazionale. [16]

Le UVAN rilevano sia per la partecipazione a MSD sia per la partecipazione ai mercati dell'energia; alle UVAN è quindi associato un punto di dispacciamento di nuova costituzione.

Le UVAN includono:

- i *punti di immissione* relativi a unità di produzione oggetto di abilitazione volontaria (inclusi i sistemi di accumulo assimilati ad unità di produzione);
- i *punti di prelievo* relativi ad unità di consumo inseriti nello stesso contratto di dispacciamento, appartenenti allo stesso nodo della rete di trasmissione nazionale e a cui non sia stato sottoscritti i contratti per il servizio di interrompibilità e di super interrompibilità per l'intera potenza disponibile sul punto di prelievo.

La controparte per la fornitura delle risorse di dispacciamento è l'utente del dispacciamento titolare del punto di dispacciamento, ossia il BSP. [19]

2.4.2.6 Altri progetti pilota

Con l'approvazione della deliberazione **402/2018/R/eel** un altro progetto pilota riguarderà la fornitura del *servizio di regolazione primaria di frequenza* per il tramite di sistemi di accumulo integrati a unità di produzione rilevanti. [18]

3 Bitcoin

Il Bitcoin è stato creato nel 2008 con la pubblicazione di un paper scientifico intitolato: "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" di *Satoshi Nakamoto* (uno pseudonimo); quest'ultimo ha concepito Bitcoin come un ecosistema di denaro digitale, crocevia delle seguenti tecnologie e concetti [23]:

- Sistema distribuito
- Crittografia
- Teoria dei giochi
- Teoria monetaria

Oggi il termine “Bitcoin” viene comunemente utilizzato per indicare [24]:

- la **rete Peer-to-Peer** (P2P) *decentralizzata*, all'interno della quale i nodi comunicano tra di loro sottostando ad una serie di regole definite nel codice sorgente del “protocollo Bitcoin”, un software open source e di facile accesso;
- la **moneta virtuale**, utilizzata per immagazzinare e trasferire valore tra i partecipanti del network Bitcoin; a differenza delle valute tradizionali però, essa non esiste fisicamente ma solo virtualmente. La moneta bitcoin può essere comprata, venduta, e scambiata con altre valute su specifici mercati di cambio.

Nel seguente elaborato si indicherà con il termine “Bitcoin” la rete peer-to-peer e con il termine “bitcoin” (con la “b” minuscola) la moneta virtuale.

L'invio di denaro tra due nodi Bitcoin avviene tramite una transazione che si propaga velocemente attraverso la rete peer-to-peer: in meno di un secondo la maggior parte dei nodi riceve la transazione e una volta che essa verrà inclusa nel nuovo blocco, sarà accettata e

3. Bitcoin

potrà essere spesa; la transazione viene quindi memorizzata in un registro distribuito pubblico e immutabile chiamato “Ledger”. Esso costituisce la **blockchain** (catena di blocchi), il libro mastro di tutte le transazioni della rete Bitcoin.

Per effettuare una transazione nel network, gli utenti di Bitcoin utilizzano due *chiavi digitali* (una *pubblica* e una *privata*) contenute in appositi portafogli digitali denominati “*wallet*”; queste chiavi forniscono agli utenti la prova di proprietà della transazione, permettendo di sbloccare la valuta da spendere e di trasferirla al nuovo ricevente.

Bitcoin, essendo un sistema decentralizzato e quindi senza alcuna autorità fiduciaria centrale, possiede il problema del raggiungimento del consenso, condizione che rende la rete non affidabile e potenzialmente compromettibile. Satoshi Nakamoto ha risolto questo problema introducendo il concetto di **Proof of Work** (*prova di lavoro*) o *PoW*, grazie al quale il consenso viene raggiunto per mezzo del processo di **mining**, che verrà approfondito nel capitolo ‘3.4 Mining’: chi per primo risolve un complesso problema matematico si guadagna il diritto di salvare il blocco, con tutte le transazioni contenute in esso, nella blockchain. Il problema matematico viene risolto attraverso calcoli svolti da hardware specifici che richiedono un consumo di energia elettrica per funzionare e quindi un costo; per incentivare coloro che svolgono queste energivore operazioni computazionali, colui che per primo trova la soluzione viene remunerato attraverso la coniazione di nuovi bitcoin e la somma delle commissioni pagate per le transazioni.

Il meccanismo di consenso di Bitcoin è però teoricamente vulnerabile agli attacchi di miner o gruppi di miner disonesti: qualora essi dovessero raggiungere una quota significativa del potere di calcolo (già a partire dal 30% del totale) potrebbero interrompere la sicurezza e la disponibilità della rete bitcoin. [25]

Questi attacchi possono influenzare il consenso del passato più recente, ossia fino a una decina di blocchi di profondità, perché la potenza di calcolo necessaria per forzare un fork (una divisione della blockchain) aumenta con la profondità della catena di blocchi, rendendo quindi praticamente immutabile un blocco dopo un certo periodo di tempo (tipicamente circa due ore per la rete Bitcoin).

3.1 Rete Peer-to-Peer

Bitcoin è strutturato come un'architettura **Peer-to-Peer** (P2P) sopra internet: i computer che partecipano alla rete vengono chiamati **nodi** e sono connessi tra di loro, fornendo e usufruendo di servizi. Non esiste alcuna gerarchia tra i nodi (si parla di rete "piatta"). [26]

Le reti Peer-to-Peer sono:

- Resilienti
- Decentralizzate (non esiste un server centrale)
- Aperte

I nodi della rete P2P Bitcoin possono avere differenti ruoli a seconda della *funzionalità* che stanno supportando:

- **Routing:** è permessa la partecipazione al network. Tutti i nodi hanno questa funzionalità;
- **Database della blockchain:** si mantiene una completa e aggiornata copia della blockchain. I nodi che possiedono questa funzionalità possono verificare autonomamente ogni transazione senza bisogno di riferimenti esterni;
- **Mining:** si compete per creare nuovi blocchi utilizzando hardware specializzati a risolvere l'algoritmo di Proof-of-Work;
- **Servizi Wallet**

Un nodo si definisce "completo" (*full node*) se supporta tutte e quattro queste funzionalità.

Tutti i nodi convalidano e propagano le transazioni ed i blocchi, inoltre individuano e mantengono collegamenti peer-to-peer con altri nodi; alcuni nodi mantengono solo un sottoinsieme della blockchain (non hanno una copia completa della blockchain.) e verificano le transazioni utilizzando un metodo chiamato SPV (*Simplified Payment Verification*). Questi nodi vengono chiamati *lightweight node* o nodi leggeri.

I nodi addetti al "mining", chiamati *mining node*, possono essere sia nodi completi che nodi leggeri; questi ultimi si basano su un server di mining per mantenere un nodo completo

Anche i Wallet (portafogli utente) possono far parte di un nodo completo, ma sempre più di frequente sono nodi leggeri

3. Bitcoin

I nodi che possiedono l'intero database blockchain e la funzionalità *Routing* (sulla rete P2P Bitcoin) vengono chiamati *full block chain node*.

La rete Bitcoin possiede attualmente circa 10 mila nodi, distribuiti come in *Figura 3.1*.



Figura 3.1: Concentrazione dei nodi di Bitcoin nel mondo [27]

3.2 Blockchain

La **blockchain** è una struttura dati costituita da un'ordinata lista di blocchi di transazioni *back-linked*, ossia in cui ogni blocco è collegato al precedente. La blockchain può essere salvata in un semplice database.

Tutti i blocchi contenuti nella blockchain sono identificati da un *Hash*, generato usando un algoritmo crittografico di hashing sull'*header* del blocco.

Un algoritmo Hash prende un input di dati di lunghezza arbitraria e produce un risultato deterministico a lunghezza fissa, un'impronta digitale digitale dell'input.

Una funzione di Hash è: [28]

- Irreversibile: dal risultato ottenuto non è possibile risalire alla stringa di lunghezza arbitraria di partenza;
- Collision-resistant: è computazionalmente impossibile trovare due input che producono lo stesso output.

L'output generato è inoltre altamente imprevedibile: piccole differenze di input producono enormi differenze nel risultato.

L'Hash non è incluso all'interno della struttura dati dei blocchi; esso viene infatti memorizzato in un database separato, al fine di facilitare l'indicizzazione e di velocizzare il recupero dei blocchi.

Per il calcolo dell'Hash di un blocco viene coinvolto anche l'Hash del blocco precedente: se per qualsiasi motivo si modificasse l'Hash del blocco a monte, conseguentemente si modificherebbe anche quello del blocco a valle e così avanti in cascata. Un blocco che ha numerosi blocchi che lo seguono non può quindi essere modificato senza forzare un ricalcolo su tutti i blocchi successivi. Visto che per questo ricalcolo servirebbe un'enorme potenza computazionale, l'esistenza di una lunga catena di blocchi fa sì che la storia più profonda della blockchain sia *immutable*, uno degli elementi chiave della sicurezza di Bitcoin. Per convenzione, quando un blocco viene salvato, qualsiasi transazione al suo interno viene confermata solo dopo 6 ulteriori blocchi salvati (circa 1 ora di tempo), mentre il premio

3. Bitcoin

Coinbase (la transazione contenente i nuovi bitcoin coniati) può essere speso dopo 100 blocchi salvati (circa 17 ore di tempo).

Il protocollo Bitcoin, l’insieme di regole che governano la rete Bitcoin, permette ad una catena di essere sostituita da una di lunghezza più lunga: la possibilità che questo accada diminuisce però con il numero di blocchi accumulati.

Si definisce innanzitutto “altezza” o *height* della blockchain la distanza di un determinato blocco rispetto al primo blocco della catena (chiamato *genesis block*), misurata in numero di blocchi; l’ultimo blocco aggiunto cronologicamente viene chiamato “*top*” o “*tip*” (cima o punta).

Quando due nodi di mining (vedi 3.4 Mining) risolvono quasi contemporaneamente la PoW salvano sulla blockchain due blocchi diversi: si verifica un “fork” (biforcazione) della blockchain, ossia a partire dal blocco precedentemente salvato si creano due blocchi lungo due diramazioni diverse: per il blocco di partenza si parlerà di “blocco genitore” mentre per i due blocchi derivati di “blocchi figli”; il fork si risolverà poi a favore del figlio con maggiore difficoltà cumulata, il quale diventerà parte della blockchain. È possibile che un fork si estenda fino a due blocchi, anche se la possibilità che ciò accada è molto bassa. È interessante notare che se si imponesse un tempo medio di scoperta di un blocco inferiore ai 10 minuti (quello di Bitcoin), si avrebbero più fork sulla blockchain. Ad esempio, per la rete di Ethereum, una rete blockchain pubblica e distribuita simile a Bitcoin, essendo il tempo medio di scoperta di un blocco di 12 secondi, si creano molti più fork.

Qualora due blocchi venissero estratti sequenzialmente in un breve lasso di tempo, potrebbe accadere che un nodo riceva prima il penultimo blocco estratto [25]; siccome il suo blocco genitore non coinciderà con l’ultimo blocco memorizzato nella blockchain di questo nodo, esso verrà chiamato blocco “orfano” e momentaneamente salvato nella “pool di blocchi orfani”, dove rimarrà fino alla ricezione del suo genitore.

Una schematizzazione del processo è raffigurata nell’immagine di *Figura 3.2*

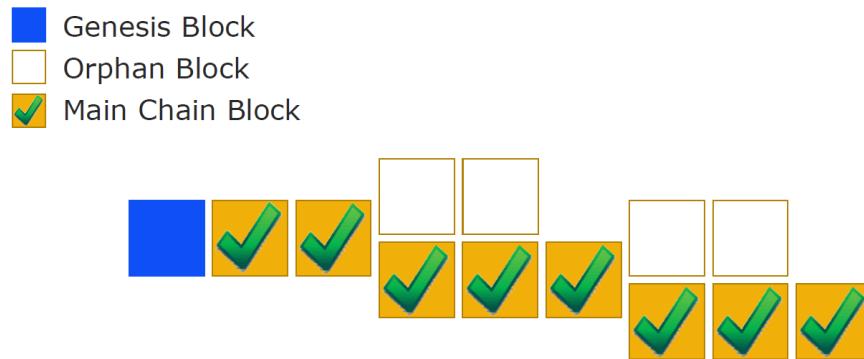


Figura 3.2: Schematizzazione fork e blocchi orfani [28]

Selezionando la catena con la maggior difficoltà, tutti i nodi raggiungono infine un consenso a livello di rete.

3.2.1 Transazioni

Una transazione comunica al network che il proprietario di un certo numero di bitcoin ha autorizzato il trasferimento di una parte di essi ad un altro proprietario. [29]

Ogni transazione contiene uno o più "input" (debiti verso un account bitcoin) e uno o più "output" (crediti aggiunti ad un account bitcoin); il totale degli output è di poco inferiore al totale degli input e la differenza rappresenta una "commissione di transazione" (*transaction fee*) che riceve il miner per il servizio fornito.

Il possessore, per mezzo di una firma digitale, attraverso la transazione trasferisce anche la prova di proprietà (*proof of property*) contenuta in essa, requisito per poter riscattare i fondi in transazioni future.

Gli output provenienti da una transazione possono essere usati come input di una nuova transazione, creando in questo modo una catena di proprietà nella quale la valuta è spostata da indirizzo a indirizzo (vedi Figura 3.3).

3. Bitcoin

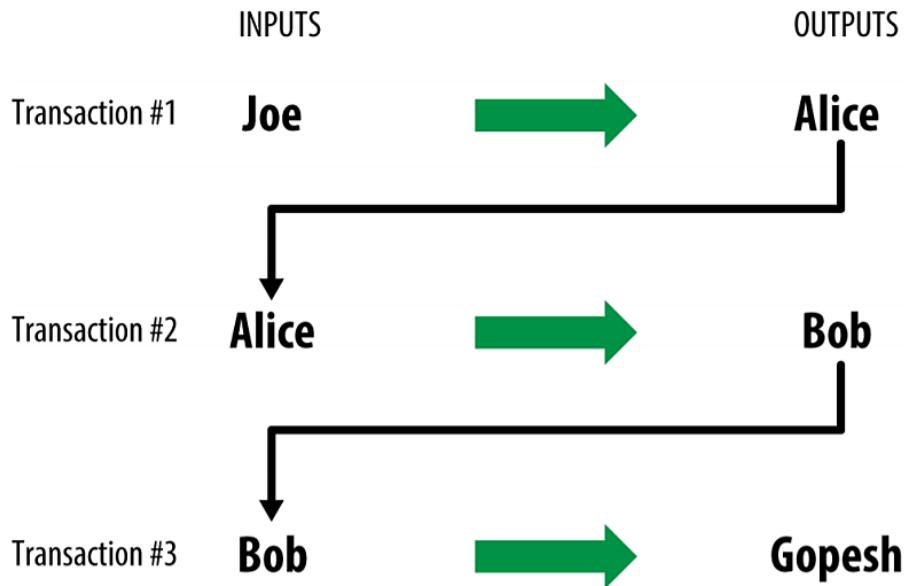


Figura 3.3: Catena di transazioni

La struttura di un normale input di transazione è la seguente [25]:

1. **“Hash della transazione”** (32 byte): puntatore alla transazione contenente l’UTXO (Unspent Transaction Outputs) che andranno spesi, ossia gli output di transazione non spesi;
2. **“Indice dell’Output”** (4 byte): il numero dell’indice della UTXO da spendere. Il primo è 0;
3. **“Dimensione dell’Unlocking-Script”** (da 1 a 9 byte): lunghezza del campo ‘Unlocking-Script’, espressa in byte;
4. **“Unlocking-Script”** (dimensione variabile): uno scrypt che completa le condizioni del locking script dell’UTXO;
5. **“Sequence Number”** (4 byte): funzione di Tx-replacement, impostato a 0Xffffffff.

La transazione di generazione, attraverso la quale vengono coniati nuovi bitcoin, possiede invece un formato speciale: non ha un input di transazione che specifica un UTXO precedente da spendere ma un input “Coinbase”.

La struttura di input di una transazione di generazione, rispetto a quella di un normale input di transazione differisce di due campi:

- “**Dimensione dei Dati di Coinbase**” (da 1 a 9 byte): lunghezza del campo ‘Dati Coinbase’, compreso tra 2 e 100 byte;
- “**Dati Coinbase**” (variabile): dati arbitrari, usati per *nonce extra* e per *tag di mining* (es. stringhe che identificano la mining pool). Nei blocchi che supportano la versione 2, deve iniziare con la ‘Block height’.

Essi andranno a sostituire rispettivamente il campo di “Dimensione dell’Unlocking-Script” e di “Unlocking-Script”; inoltre nel campo “Hash della transazione” tutti i bit saranno a zero, mentre nel campo “Indice dell’output” tutti i bit sono espressi come 0Xffffffff.

3.2.2 Struttura di un blocco

Un blocco è un contenitore di una struttura dati utilizzata per includere le transazioni nel “Ledger” o registro pubblico (vedi Figura 3.4); ad esso sono associate le seguenti informazioni [30] [31] :

- “**Magic no**” o “*Magic number*” (4 byte): un valore costante pari a 0Xd9B4BEF9 che identifica la rete Blockchain;
- “**Block Size**” o *Dimensione del blocco* (4 byte): attualmente ogni blocco è fissato ad 1 MB. La capacità massima è di 2 GB;
- “**Block header**” o *Header del blocco* (richiede 80 byte di spazio): è l’intestazione del blocco e contiene le informazioni riassuntive del blocco stesso;
- “**Transaction Counter**” o *Contatore di transazione* (da 1 a 9 byte): indica quante transazioni sono contenute nel blocco;
- “**Transaction List**” (byte variabili: max 1 MB): la lista di transazioni registrate nel blocco.

Il “Block header” a sua volta fornisce le seguenti informazioni [25] [32]:

- “**Version**” o *Versione* (4 byte): è la versione del software o protocollo;

3. Bitcoin

- “**Previous block Hash**” o *Hash del blocco precedente* (32 byte): l’Hash del blocco precedente nella blockchain;
- “**Merkle Root**” (32 byte): l’Hash della radice del *merkle tree*; quest’ultimo è una struttura dati usata per indicizzare efficientemente e verificare l’integrità delle transazioni contenute nel blocco;
- “**Timestamp**” (4 byte): il tempo approssimato della creazione del blocco, codificato come timestamp “Epoch” di Unixin (numero di secondi trascorsi a partire dal 1° gennaio 1970 UTC/GMT);
- “**Bits**” o “*Difficulty Target*” (4 byte): forma compatta coefficiente di mantissa-esponente (3 byte-1 byte) del *Target Threshold*, ossia della soglia al di sotto della quale l’Hash del blocco deve valere affinché possa essere ritenuto valido;
- “**Nonce**” (4 byte): un numero utilizzato per l’algoritmo di PoW, inizializzato a 0.

Gli Hash dei campi del Block header sono espressi in *internal byte order* (l’ordine standard nel quale gli Hash digest sono visualizzati come stringhe), mentre gli altri valori in *little-endian order* (si inizia dal byte meno significativo e si finisce con quello più significativo).

Tutti i valori del block header sono poi serializzati come in Figura 3.5.

Il gruppo di metadata comprendente *Timestamp*, *Bits* e *Nonce* riguarda la competizione del mining.

Il massimo valore di “*Bits*” è 0x1d00ffff, utilizzato nella transazione genesi [33], nel quale “0x” indica che le cifre riportate successivamente sono espresse in formato esadecimale, “1d” indica l’esponente e “00ffff” indica il coefficiente.

Il *Target Threshold* si calcola poi come:

$$\frac{\text{Target}}{\text{Threshold}} = \text{Coefficiente} \cdot 2^{8 \cdot (\text{Esponente}-3)} \quad (4)$$

Il *Target Threshold* del blocco genesi risulta quindi valere [34]:

in esadecimale: 00000000ff

in decimale: 2.69595352910113E+67

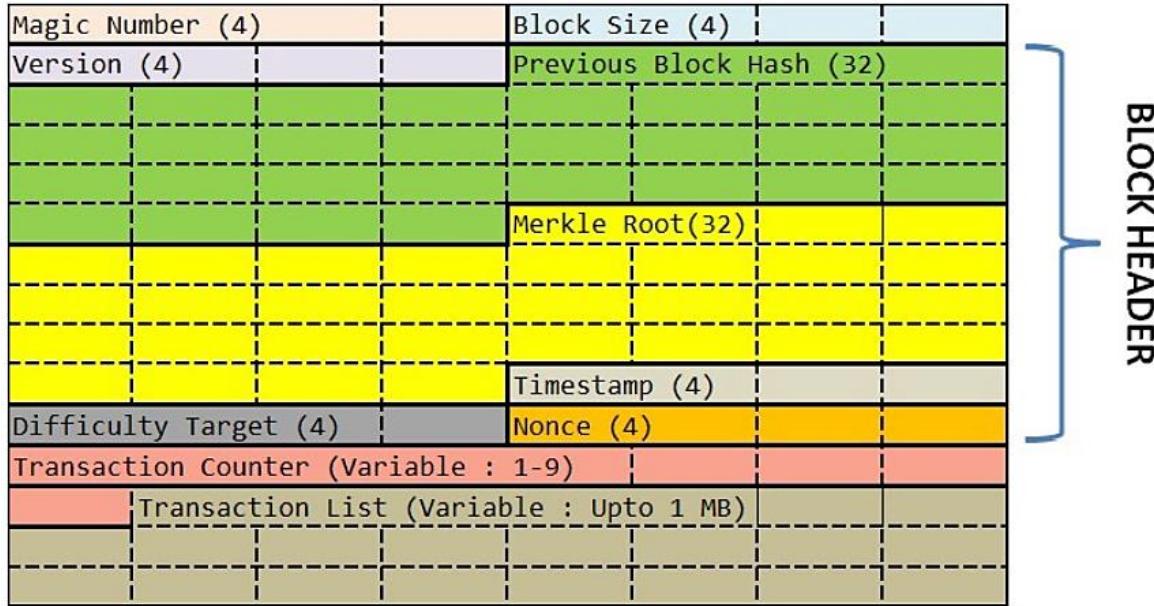


Figura 3.4: Struttura schematizzata di un blocco della rete Bitcoin [31]

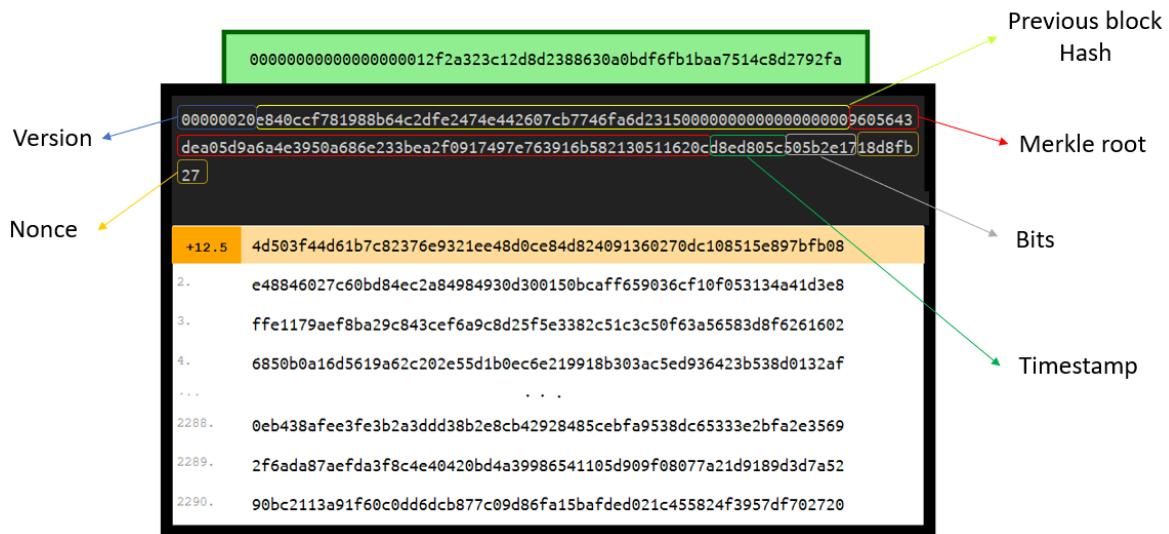


Figura 3.5: Esempio di Block header serializzato

L'**Hash di intestazione del blocco**, ossia il numero di riferimento del blocco (evidenziato in verde nella Figura 3.5), si ottiene applicando per due volte la funzione di hashing SHA256 all'intestazione del blocco (evidenziato in nero nella Figura 3.5). [35]

3. Bitcoin

Con la funzione SHA256, l'output ottenuto risulta essere sempre lungo 256 bit, indipendentemente dalla dimensione dell'input (espresso in formato esadecimale risulta essere una stringa di 64 caratteri).

3.3 Crittografia

La *crittografia a chiave pubblica* è stata inventata negli anni '70 (1970) ed è una delle basi matematiche dei computer e della sicurezza informatica. [36]

In Bitcoin, si utilizza la crittografia a chiave pubblica per creare una **chiave privata (k)** e una **chiave pubblica (K)**; questa coppia di chiavi è contenuta nel portafoglio Bitcoin di ogni utente. Dalla chiave pubblica (K), verrà poi utilizzata una funzione di Hash crittografica unidirezionale per generare un **indirizzo bitcoin**.

3.3.1 Chiave privata

La **chiave privata (k)** è un numero, di solito scelto a caso, compreso tra 1 e poco meno di 2^{256} ; viene utilizzata per creare firme che sono necessarie per trasferire bitcoin dimostrando la proprietà dei fondi utilizzati in una transazione. È necessario però che essa rimanga segreta perché rivelarla a terzi darebbe a loro il controllo sui bitcoin associati alla chiave stessa; inoltre bisogna evitare di perderla perché in tal modo verrebbero persi anche i fondi ad essa associati.

3.3.2 Chiave pubblica

La **chiave pubblica (K)** è calcolata a partire dalla *chiave privata* utilizzando la proprietà di *moltiplicazione delle curve ellittiche*:

$$K = k \cdot G \quad (5)$$

dove G è un punto costante della curva ellittica chiamato *punto di generazione*. Poiché il punto di generazione è sempre lo stesso per tutti gli utenti di bitcoin, una chiave privata k moltiplicata per G avrà sempre la stessa chiave pubblica.

La chiave pubblica risulterà un punto su una curva ellittica (vedi Figura 3.6).

La funzione matematica utilizzata è unidirezionale: una chiave privata può essere convertita in una chiave pubblica, ma non viceversa; l'operazione inversa, conosciuta come “trovare il logaritmo discreto”, può essere condotta solo attraverso una ricerca “*brute force*”.

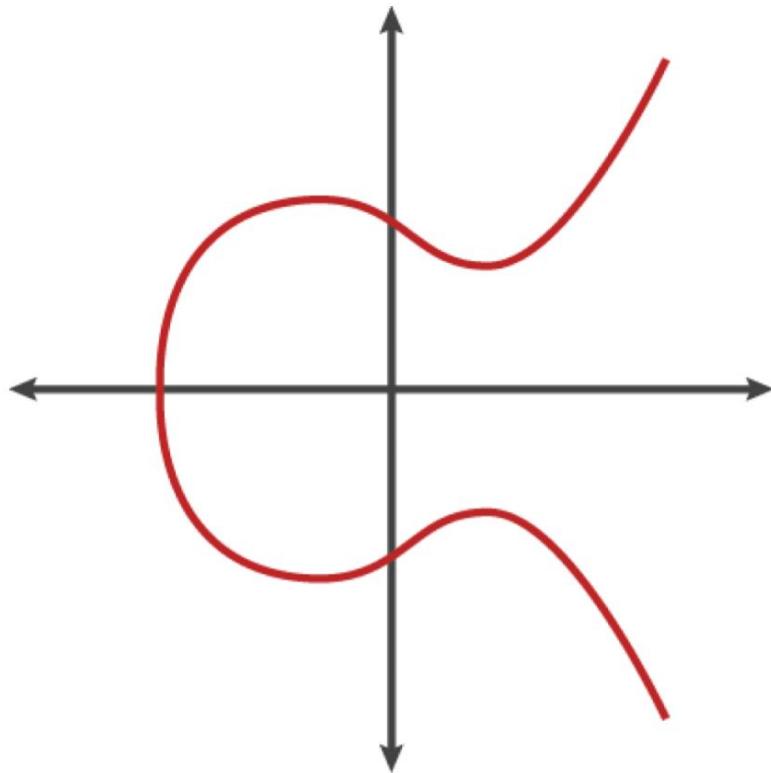


Figura 3.6: Raprresentazione di una curva ellittica

Bitcoin utilizza una curva ellittica specifica (*Elliptic Curve Digital Signature Algorithm* o ECDSA) e una serie di costanti matematiche, definite in uno standard detto **secp256k1**, stabilita dalla *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

La curva secp256k è definita dalla seguente funzione:

$$y^2 = (x^3 + 7) \quad (6)$$

Questa curva è definita su un campo finito di ordine primo ‘p’, dove $p = 2^{256} - 2^{32} - 2^9 - 2^8 - 2^7 - 2^6 - 2^4 - 1$ è un numero primo molto grande.

3.3.3 Indirizzo bitcoin

Un **indirizzo bitcoin** è una stringa di cifre e caratteri che inizia con la cifra numerica "1"; può essere condiviso con chiunque desideri inviarti denaro.

L'indirizzo bitcoin è derivato dalla chiave pubblica attraverso l'uso di due algoritmi di Hash: il *Secure Hash Algorithm* (SHA) ed in sequenza il *RACE Integrity Primitives Evaluation Message Digest* (RIPEMD) dove RACE è a sua volta l'acronimo di *Research and Development in Advanced Communications Technologies*. I due algoritmi citati vengono comunemente chiamati **SHA256** e **RIPEMD160**.

Al valore ottenuto viene effettuata la codifica chiamata "**Base58Check**", consistente nei seguenti passaggi, schematizzati in Figura 3.7:

1. Si aggiunge un prefisso chiamato “byte di versione”, che serve a identificare facilmente il tipo di dato codificato, ottenendo:

$$\text{prefisso} + \text{dati}$$

2. Si calcola il Checksum a “doppio SHA” sul risultato precedente:

$$\text{Checksum} = \text{SHA256}(\text{SHA256}(\text{prefisso} + \text{dati})) \quad (7)$$

Per l'esattezza si applica l'algoritmo di hashing SHA256 due volte; si otterrà il Checksum prendendo i primi quattro byte dell'Hash risultante. Esso servirà come codice di controllo degli errori.

3. Si concatena il Checksum alla stringa ottenuta nel punto 1):

- $(\text{prefisso} + \text{dati}) \parallel \text{Checksum}$

4. Il risultato ottenuto viene codificato utilizzando l'alfabeto *Base58*

La codifica “Base58Check” viene fatta per facilitare la leggibilità umana, evitando ambiguità, e per proteggere contro errori nella trascrizione e nell’ ingresso di indirizzi. Una sua schematizzazione è raffigurata in Figura 3.7.

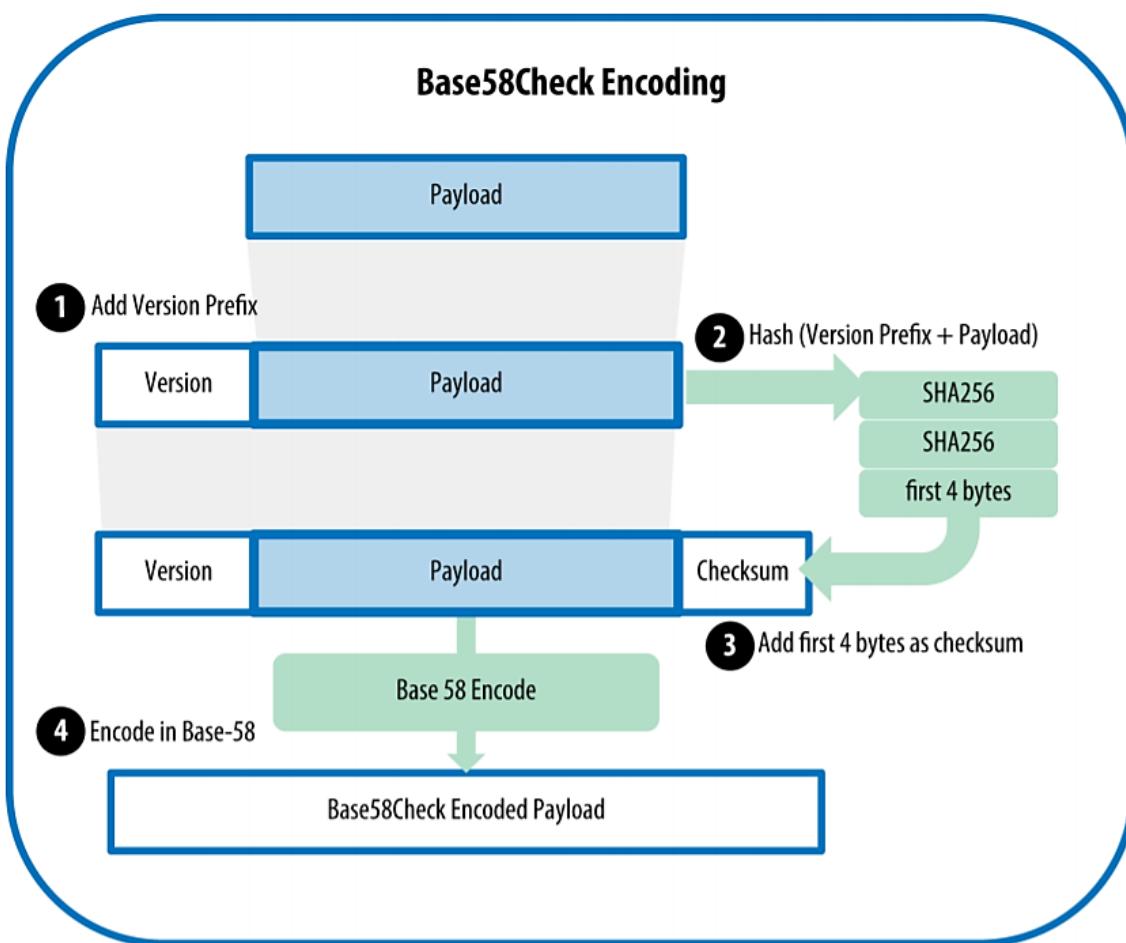


Figura 3.7: Schematizzazione codifica Base58Check

Volendo schematizzare l’intero processo di generazione di un indirizzo bitcoin a partire dalla chiave privata, si ottiene lo schema di *Figura 3.8*.

3. Bitcoin

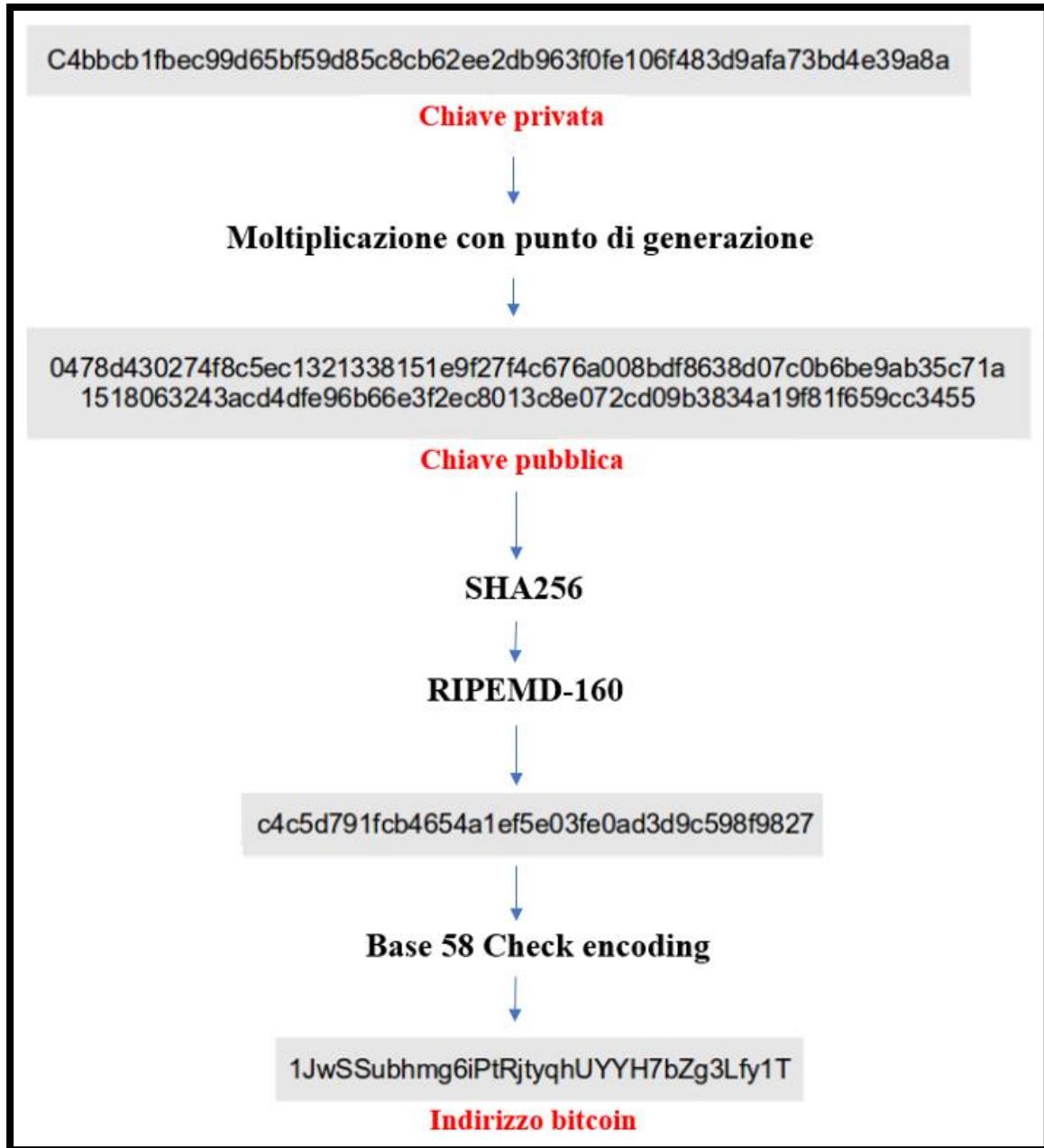


Figura 3.8: Schematizzazione dell'intero processo di generazione di un indirizzo bitcoin

3.3.4 Wallet

I **Wallet** sono contenitori di chiavi private, solitamente implementati come file strutturati o semplici database [36]. I Wallet di Bitcoin contengono quindi chiavi, non monete: gli utenti, firmando le transazioni con le chiavi, dimostrano di possedere gli output delle transazioni stesse, ossia le loro monete, le quali vengono poi memorizzate sulla blockchain.

Esistono essenzialmente due tipologie di Wallet:

- **Wallet Nondeterministici:** sono portafogli che contengono chiavi private generate casualmente. Hanno lo svantaggio che ogni chiave deve essere salvata oppure i fondi che controlla verrebbero persi irrevocabilmente se il Wallet diventasse inaccessibile; necessitano quindi di continui backup, condizione che li rende scomodi da gestire, sconsigliandone il loro utilizzo.
- **Wallet Deterministici**, detti anche "*seeded*": sono portafogli che contengono chiavi private derivate da un seme comune (vedi Figura 3.9), attraverso l'uso di una funzione di Hash unidirezionale. Il *seme* è un numero generato in modo casuale che viene combinato con altri dati per derivare le chiavi private; in un portafoglio deterministico, il seed è sufficiente per ripristinare tutte le chiavi derivate e pertanto è sufficiente un singolo backup al momento della creazione.

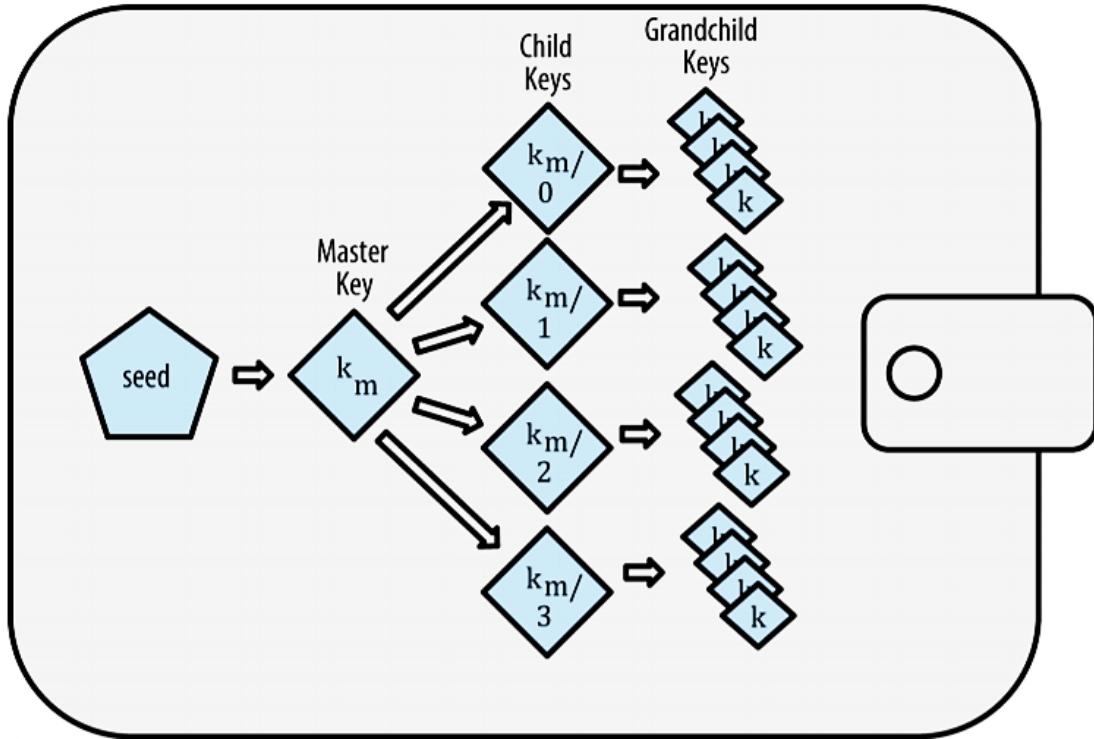


Figura 3.9: Albero di chiavi generato da un singolo seme

3.4 Mining

Il Mining è il processo attraverso il quale:

- vengono creati nuovi bitcoin
- si protegge il sistema Bitcoin da transazioni fraudolente o transazioni che cercano di spendere lo stesso numero di bitcoin più di una volta, problema conosciuto con il nome di *double-spending* (doppia-spesa).

Coloro che provvedono alla potenza di calcolo per il network Bitcoin vengono chiamati **miner**; in cambio del loro servizio essi ottengono la possibilità di essere ricompensati con dei bitcoin [25]. I miner validano nuove transazioni e le registrano sulla *ledger* globale; un nuovo blocco, contenente le transazioni che sono transitate all'interno della rete a partire dalla scoperta del blocco precedente, viene aggiunto alla blockchain mediamente ogni 10 minuti; per le transazioni appartenenti ad un determinato blocco, ad ogni blocco aggiunto

successivamente si ha una “conferma” dell’avvenuta trascrizione nella blockchain; dopo 6-7 conferme i bitcoin associati a quelle transazioni diventano spendibili dai nuovi proprietari.

Alla base del modello di sicurezza di Bitcoin c’è la risoluzione da parte dei miner del problema chiamato *Proof of Work* (prova di lavoro): esso consiste in un difficile problema matematico basato su un algoritmo crittografico di hashing; i miner competono tra di loro per risolverlo e colui che per primo ci riesce ottiene delle ricompense e il diritto di registrare le transazioni nella blockchain. La denominazione “Prova di lavoro” deriva proprio dal fatto che per ottenere la soluzione i miner impiegano un certo sforzo computazionale.

La competizione tra i minatori termina con la ricezione di un nuovo blocco, azione che si traduce nell’annuncio di un vincitore. La fine della competizione per un blocco coincide però con l’inizio della competizione per il blocco successivo: il nodo costruisce subito un nuovo blocco, chiamato “*candidate block*”, non è ancora un blocco valido in quanto non contiene una valida Proof of Work e raccoglie, convalida ed inoltra nuove transazioni in una *memory pool* o *transaction pool* dove esse attendono fino a quando non vengono incluse in un blocco; qualora il blocco venisse chiuso da un altro nodo, le transazioni presenti nella memory pool che sono state incluse in questo nuovo blocco verranno rimosse.

Per costruire il *candidate block*, il nodo bitcoin seleziona le transazioni dalla memory pool, applicando una metrica di priorità a ciascuna transazione e aggiungendo prima le transazioni con priorità più alta. Vengono privilegiate le transazioni che possiedono gli input vecchi e di alto valore, rispetto a quelle che hanno input nuovi e piccoli. Con il passare del tempo, una transazione senza commissioni potrebbe quindi raggiungere una priorità sufficientemente alta da essere inclusa nel blocco gratuitamente.

Quando una transazione diventa valida, manterrà questo status per sempre. Se non viene salvata in un blocco, però, essa esisterà fintanto che viene mantenuta in almeno una pool di memoria: qualora l’ultimo nodo di mining in cui essa risiedesse venisse riavviato, essendo la memory pool una forma di memoria temporanea, quest’ultima verrebbe cancellata e con essa la transazione stessa.

3. Bitcoin

Una volta che viene costruito il **blocco candidato**, l'hardware predisposto a fornire la potenza computazionale inizia a cercare la soluzione che rende valido il blocco: viene fatto variare il valore del *nonce*, solitamente incrementando di una unità per volta, fino a quando l'Hash di intestazione del blocco non assume un valore inferiore a quello del parametro di “*Target threshold*”; essendo il *Nonce* costituito da 32 bit (corrispondenti a 2^{32} numeri, cioè circa 4,3 miliardi numeri), qualora non si trovasse la soluzione tra tutti questi possibili valori, si utilizzerebbe come spazio extra parte di quello fornito dal campo “*Dati Coinbase*” dell'input di transazione generativa del blocco candidato; il numero risultante si chiamerebbe “*extra nonce*” ed occuperebbe 8 byte, fornendo quindi ulteriori 2^{64} numeri (pari a circa $1,84 \times 10^{19}$ combinazioni). Qualora, nel brevissimo lasso di tempo in cui si stesse usufruendo di questo ulteriore spazio, si modificassero le informazioni contenute nel *block header* (il *Timestamp* o il *Merkle Root*), il *Nonce* verrebbe riazzerato e così l'*extra nonce* e il conteggio ripartirebbe.

Qualora un miner riuscisse a trovare la soluzione, essa verrebbe mandata al nodo di data mining che la inserirebbe nel *Block Header*, generando l'Hash di intestazione del blocco; il nodo trasmetterebbe poi il blocco a tutti i nodi a cui fosse collegato, i quali, dopo aver eseguito una serie di test, lo convaliderebbero e lo propagherebbero ad ulteriori nodi: il blocco minato verrebbe così diffuso in tutta la rete Bitcoin. Contemporaneamente, inoltre, i nodi aggiungerebbero il blocco anche alla propria copia della blockchain.

I blocchi dei minatori che agissero dishonestamente verrebbero respinti facendo perdere loro la ricompensa; essi dovranno inoltre far fronte alle spese di corrente elettrica richiesta per i calcoli computazionali necessari alla risoluzione della Proof of Work.

I miner ricevono due tipi di ricompense per il lavoro di mining:

- nuovi bitcoin coniati per ogni nuovo blocco trovato;
- commissioni (*fee*) di transazione per tutte le transazioni incluse nel blocco trovato.

Il numero di bitcoin ottenuti come ricompensa per ogni blocco minato viene dimezzato ogni 210.000 blocchi (circa ogni quattro anni), considerando come valore di partenza quello di

50 bitcoin per blocco (Gennaio 2009).² La creazione di bitcoin continuerà fino a quando non verranno raggiunti i 21 milioni di bitcoin in circolazione e ciò accadrà approssimativamente nel 2140 (in totale verranno eseguiti 64 dimezzamenti). Il processo di generazione di nuova moneta è difatti chiamato *mining* perché simula il funzionamento dell'estrazione di metalli preziosi, ossia man mano che vengono creati bitcoin (o estratti metalli preziosi), essendo il loro quantitativo limitato, si avrà un rendimento via via decrescente. Vedi Figura 3.10.

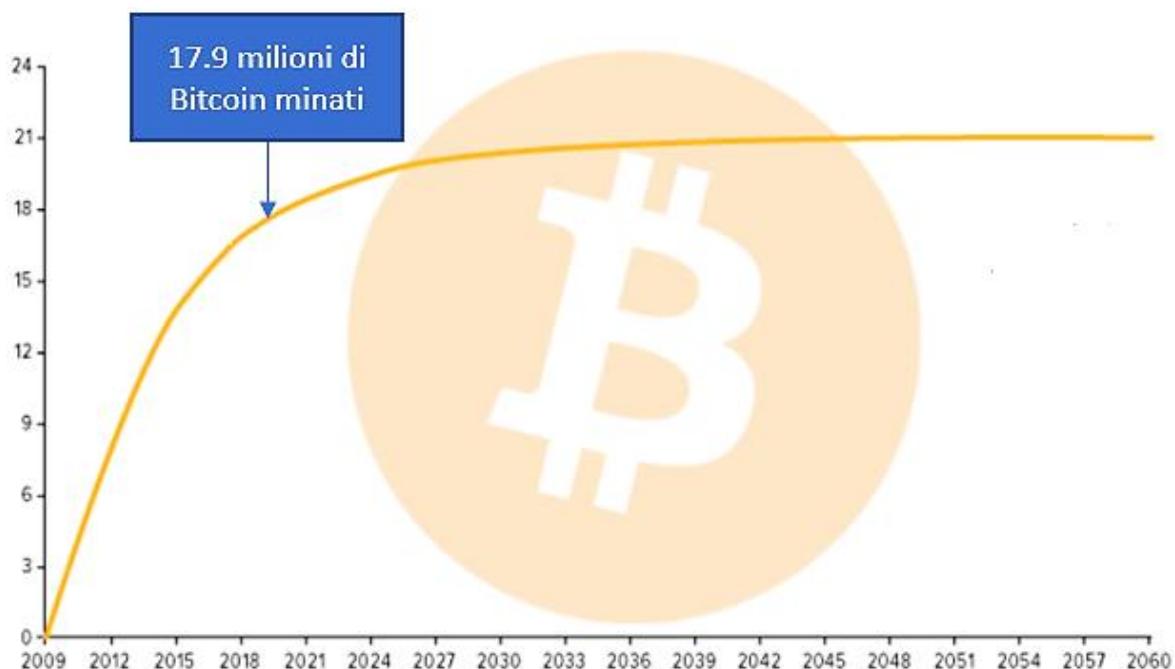


Figura 3.10: Totale bitcoin in circolazione nel tempo

Le commissioni sulle transazioni contenute nel blocco rappresentano solo una piccola parte delle ricompense totali ottenute dai miner; dato che il numero di bitcoin coniati diminuisce nel tempo, esse tenderanno però ad assumere una quota sempre più rilevante, fino a quando, dopo il 2140 circa, tutti i guadagni dei miner saranno nella sola forma di commissione di transazione.

² In data 31 agosto 2019 risulta una ricompensa di 12.5 bitcoin per blocco; si prevede che per maggio 2020 si debba avere il prossimo *halving* (dimezzamento).

Queste remunerazioni non devono però essere confuse come lo scopo principale del mining: esse sono solo il mezzo (l'incentivo) usato al fine di implementare la fornitura monetaria e contemporaneamente raggiungere la sicurezza di una rete che, per il consenso, non richiede alcuna autorità centrale.

3.4.1 Hardware

Il nodo di mining in esecuzione trasmette l'intestazione del blocco al suo hardware di data mining, che inizia a testare un elevato numero di *Nonce* al secondo.

A livello fisico la potenza di elaborazione può essere fornita da:

- **CPU** (*Central processing Unit*), uno dei componenti principali dell'hardware di un computer. Essenzialmente è un processore a cui viene affidato il compito di eseguire le istruzioni di un programma presente in memoria centrale. La velocità di calcolo della CPU (misurata in Hz) è uno dei principali fattori determinanti della rapidità di esecuzione di un programma da parte del computer. [37]
- **GPU** (*Graphics Processing Unit*), un processore grafico che viene utilizzato come coprocessore della CPU; funziona a frequenza più bassa della CPU ma è molto più veloce nell'eseguire i compiti in cui è specializzato; è generalmente utilizzato per la grafica 3D dei videogames. [38]
- **FPGA** (*Field Programmable Gate Array*): un dispositivo formato da un circuito integrato le cui funzionalità sono programmabili tramite un linguaggio di descrizione hardware. [39]
- **ASIC** (*Application Specific Integrated Circuits*): un circuito integrato creato appositamente per risolvere un'applicazione di calcolo ben precisa.

L'hardware necessario alle operazioni di mining diventa obsoleto in fretta in quanto la difficoltà di calcolo per arrivare alla soluzione della *Proof of Work* aumenta costantemente all'interno della blockchain [40]. Agli esordi (2009) il mining di Bitcoin poteva essere svolto da chiunque possedesse un computer (CPU); verso la fine del 2010 venne rilasciato un software che permise di minare anche grazie all'utilizzo delle GPU. Dal 2011 vennero sviluppati gli FPGA che consentirono un ulteriore salto tecnologico e prestazionale; l'ultima evoluzione ha portato nel 2013 all'introduzione nel mercato degli ASIC, circuiti integrati sviluppati appositamente per svolgere al meglio l'algoritmo crittografico utilizzato dalla rete di Bitcoin.

3.4.2 Mining Pool

In un contesto così competitivo come quello del mining, per un singolo miner è praticamente impossibile trovare un blocco [25]; i miner, quindi, collaborano tra di loro contribuendo a creare le cosiddette ***mining pools***. All'interno di esse, ogni miner fornisce la propria potenza computazionale e, una volta che viene trovato un blocco, condivide la ricompensa con tutti i partecipanti alla pool; così facendo un miner riceve una quota minore della ricompensa complessiva ma con una frequenza maggiore. Si avranno quindi entrate regolari e affidabili nel tempo.

I singoli miner vengono configurati per connettersi a un server della mining pool. Le ricompense dei blocchi vincenti vengono accreditate a un indirizzo bitcoin della pool e, una volta che la quota premi dei singoli miner ha raggiunto una determinata soglia, il server della pool esegue i pagamenti agli indirizzi bitcoin dei miner. Le ricompense vengono fornite in proporzione alla potenza computazionale che ognuno di loro ha messo a disposizione.

Per fornire il servizio di mining pool, il server pool richiede una commissione sulle ricompense ricevute.

3. Bitcoin

Esistono numerose tipologie di ricompense, essenzialmente dipendenti dalla tolleranza di rischio che si vuole assumere. Le principali sono:

1. Proportional

I minatori ricevono delle “share” o azioni in proporzione all’hashing power che essi forniscono alla mining pool; una volta che il blocco viene trovato, la pool paga i minatori in base alle quantità di azioni che essi hanno ricevuto. Ogni azione ha un valore pari al premio del blocco ricevuto (premio Coinbase) diviso il numero totale di azioni ottenute da tutti i minatori durante quel round di mining.

2. Pay Per Share

- **PPS** (*Pay Per Share*) si riferisce ad un sistema di ricompensa in cui i minatori ricevono delle “share” in proporzione all’hashing power che essi forniscono alla mining pool; il tasso di emissione delle azioni è fisso e noto in anticipo. Le azioni possono essere poi remunerate attraverso il saldo della mining pool in qualsiasi momento [41]. Esso è utilizzato ad esempio come metodo di pagamento all’interno delle seguenti mining pool: “ViaBTC” (4% di commissione);
- **FPPS** (*Full Pay Per Share*): simile alla PPS con la differenza che vengono allocate anche le commissioni transazionali associate ai blocchi minati (queste ultime secondo il metodo PPLNS, che verrà descritto successivamente). Se da una parte i minatori godranno di un pagamento più stabile, dall’altra la pool gli farà pagare una commissione più elevata per mitigare il rischio che essa corre pagando regolarmente [41]. FPPS è utilizzato ad esempio come metodo di pagamento all’interno della mining pool “Poolin” (4% di commissione) e “BTC.com” (1.5 % di commissione);
- **PPS+** (*Pay Per Share plus*): simile alla PPS con la differenza che vengono allocate anche le commissioni transazionali associate ai blocchi minati [41]. Una parte delle fee incassate dalla pool vengono poi redistribuite ai miner che contribuiscono maggiormente alla crescita della pool stessa. Esso è utilizzato,

ad esempio, come metodo di pagamento all'interno delle seguenti mining pool: “AntPool” (4% di commissione) e “F2Pool” (2.5% di commissione).

3. Pay Per Last N Shares

PPLNS è un sistema di ricompensa in cui i minatori vengono remunerati in proporzione alle “share” guadagnate durante una finestra temporale predefinita, comprendenti le ultime N share emesse dalla mining pool e che termina con la risoluzione di un blocco. N è un valore solitamente impostato come multiplo (generalmente 2) della difficoltà della pool. Le share emesse al di fuori della finestra temporale non vengono remunerate [41]. PPLNS è stato sviluppato per premiare i minatori fedeli alla stessa pool, perché con esso la componente “fortuna” influisce poco. Esso è utilizzato, ad esempio, come metodo di pagamento all'interno della mining pool: “ViaBTC” (2% di commissione), “AntPool” (0% di commissione).

4. Score

L’hashing power fornito dai minatori viene misurato dal parametro “Scoring Hash rate”, una media mobile esponenziale (EMA) dell’Hash rate effettivamente fornito nel tempo. La ricompensa ricevuta per l’Hash rate fornito alla mining pool può essere approssimativamente calcolato attraverso la seguente equazione [42]:

$$\begin{aligned}
 \textbf{Ricompensa} &= && (8) \\
 &= \textit{Premio blocco} \cdot (1 - \textit{commissione pool}) \cdot \\
 &\quad \cdot \frac{\textit{minatore Scoring hash rate}}{\textit{pool Scoring hash rate}}
 \end{aligned}$$

Questa modalità di remunerazione rende il calcolo dei premi più stabile ed equo nel tempo.

L’andamento dello “Score Hash rate” confrontato con l’Hash rate teoricamente fornito da un minatore può essere schematizzato nella Figura 3.11.

3. Bitcoin

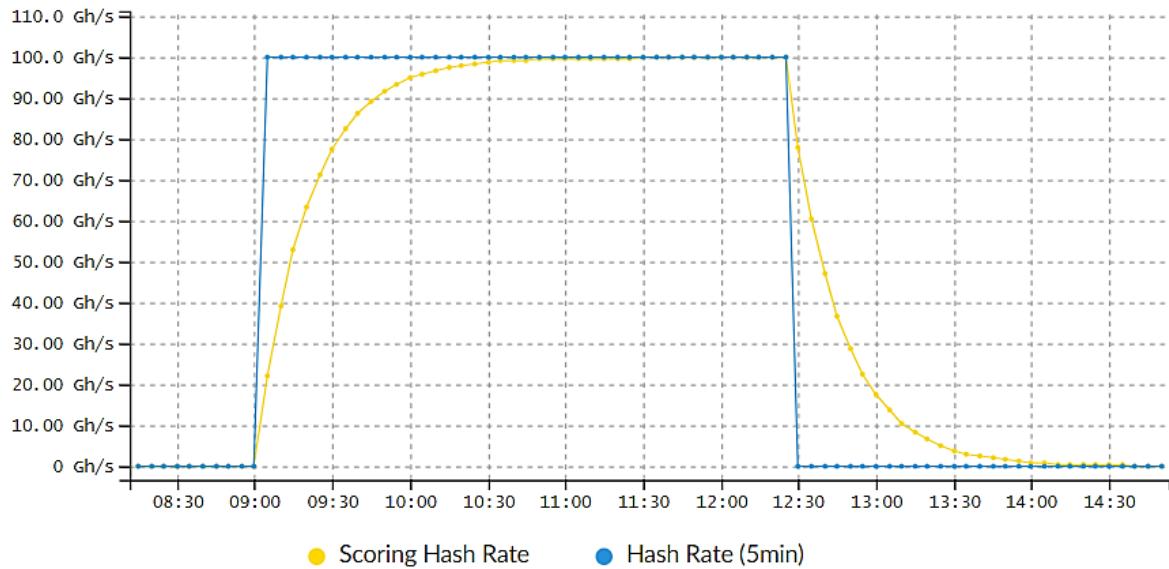


Figura 3.11: Confronto dell'andamento nel tempo tra Hash rate teorico fornito e "Scoring Hash rate" [42]

In realtà l'andamento dell'Hash rate nel tempo fornito da un minatore (la curva blu) è più simile a quello del grafico di Figura 3.12.



Figura 3.12: Confronto dell'andamento nel tempo tra Hash rate effettivo fornito e "Scoring Hash rate" [42]

Quando viene trovato un blocco i minatori vengono premiati ricevendo il premio Coinbase e le commissioni delle transazioni contenute nel blocco in proporzione al totale dello “scoring Hash rate” della pool [42]. Esso è utilizzato ad esempio come metodo di pagamento all’interno della mining pool “SlushPool” (2% di commissione).

Rischi legati al mining

Attualmente circa l’80% dell’Hash rate globale della rete Bitcoin è concentrato nelle mining pool cinesi (vedi Figura 3.13 e Tabella 3.1): BTC.com (17.1%), Poolin (14.5%), F2Pool (13.8%), AntPool (11.7%), ViaBTC (7.9%), Huobi.pool (7.5%), BTC.TOP (5.1%), BytePool (2.3%); le maggiori tra le mining pool non cinesi risultano essere SlushPool (6.6%), i cui Data Center sono installati in Repubblica Ceca e BitFury (2.6%), operante tra Georgia, Islanda, Canada, Norvegia. Il 6% dei blocchi minati non risultano inoltre essere identificati da una specifica Mining Pool.

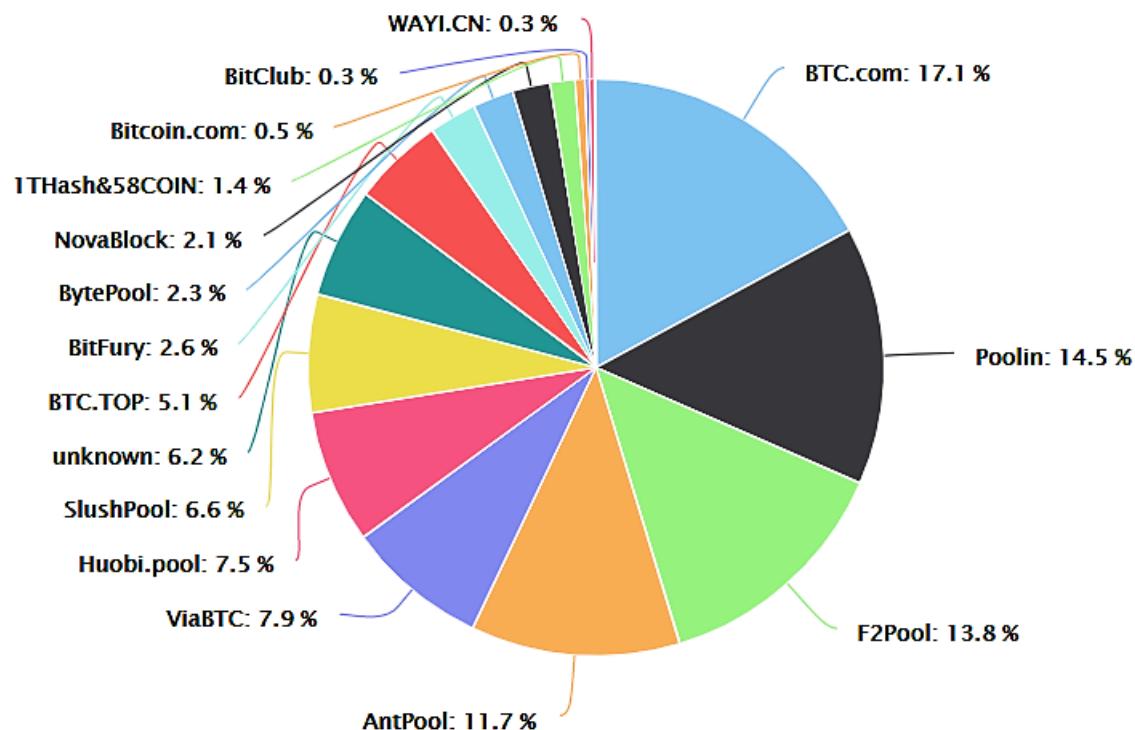


Figura 3.13: Distribuzione % Hash rate negli ultimi 7 giorni tra le varie mining pool, in data 16 settembre 2019 [43]

3. Bitcoin

	Pool	Hashrate Share	Hashrate	Blocks Mined
0	NETWORK	100.00 %	90.26 EH/s	1,134
1	BTC.com	17.11 %	15.44 EH/s	194
2	Poolin	14.46 %	13.05 EH/s	164
3	F2Pool	13.76 %	12.42 EH/s	156
4	AntPool	11.73 %	10.59 EH/s	133
5	ViaBTC	7.94 %	7.16 EH/s	90
6	Huobi.pool	7.50 %	6.77 EH/s	85
7	SlushPool	6.61 %	5.97 EH/s	75
8	unknown	6.17 %	5.57 EH/s	70
9	BTC.TOP	5.11 %	4.62 EH/s	58
10	BitFury	2.65 %	2.39 EH/s	30

Tabella 3.1: Lista delle prime 10 mining pool degli ultimi 7 giorni in data 16 settembre 2019 [43]

Risulta quindi evidente come il mercato cinese delle criptovalute sia il più grande del mondo in termini di mining pool. Questo grande accentramento del mining può nascondere diversi rischi; innanzitutto il concetto stesso di sistema decentralizzato, alla base della rivoluzione Bitcoin, è a rischio: l'indipendenza tanto voluto e ricercata potrebbe venirne a meno [44]. Aspetto ancora più importante è quello legato alla sicurezza: le prime 4 mining pool possiedono più del 50% dell'Hash rate globale e, qualora avessero intenzioni malevoli, potrebbero attaccare la blockchain. Anche se questo pericolo è reale, appare difficile che si concretizzi: risulterebbe controproducente per i miner riscrivere anche solo una piccola parte della blockchain, non solo in termini di spesa computazionale, ma soprattutto in termini di immagine; in seguito ad un attacco, il mercato perderebbe la fiducia nei confronti di Bitcoin e il suo prezzo collasserebbe.

3.4.3 Hash Rate

L'**Hash rate o Hashrate** è la velocità alla quale viene generato l'Hash di intestazione del blocco; può essere anche visto come l'unità di misura della potenza di elaborazione della rete Bitcoin. Esso viene misurato in [H/s] cioè numero di Hash per unità di secondo ma, a causa del suo elevato valore, vengono solitamente utilizzati alcuni suoi multipli quali [TH/s] (TeraHash: 10^{12} Hash) o [Eh/s] (ExaHash: 10^{18} Hash).

Volendo riportare l'andamento nel tempo dell'Hash Rate globale della rete Bitcoin si ottiene il seguente grafico:

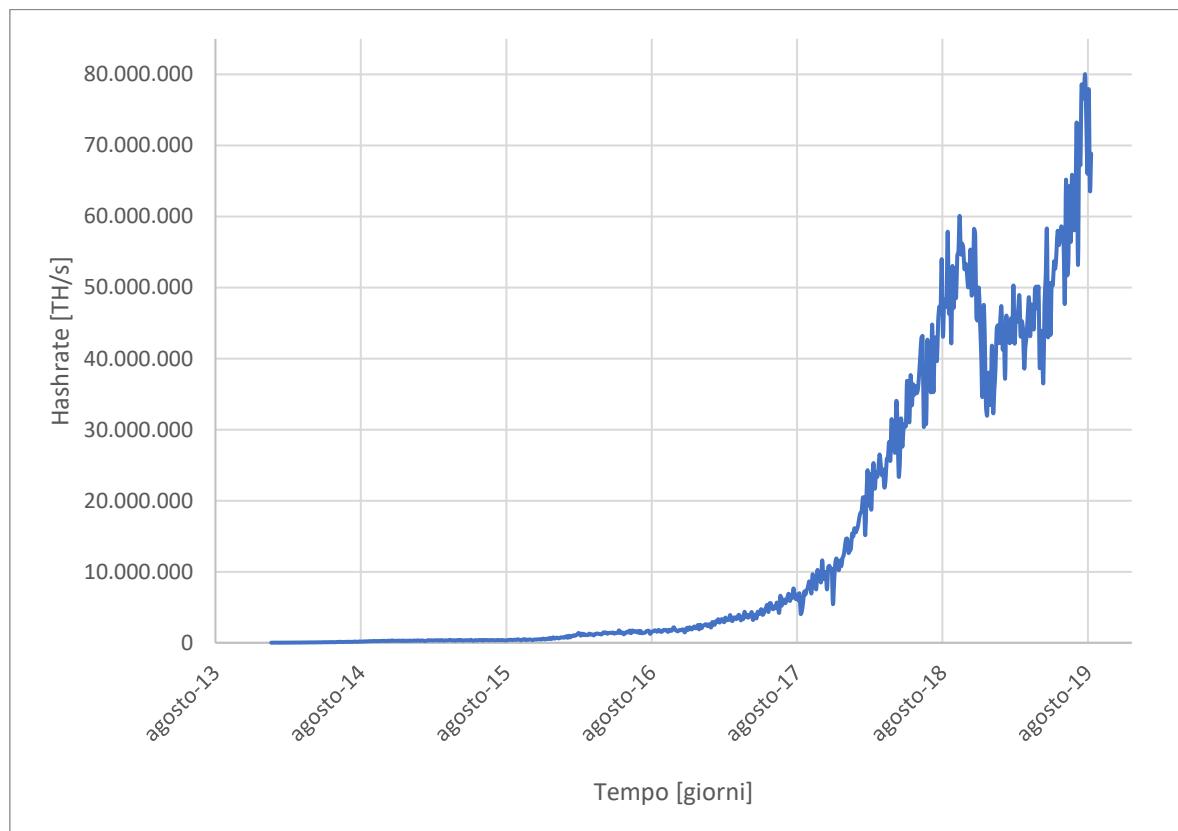


Figura 3.14: Andamento Hashrate globale della rete Bitcoin nel tempo a partire dal 2014 in data 24 agosto 2019 [45]

Il mining di Bitcoin è un settore estremamente competitivo; dalla Figura 3.14 si può notare come l'Hash rate abbia un andamento esponenziale nel tempo che segue grossolanamente

quello del prezzo di Bitcoin; questa analogia nel trend deriva dal fatto che maggiore è l'interesse del mercato nel voler acquistare un determinato asset (la valuta digitale bitcoin) e maggiore sarà il valore che esso assumerà, con conseguente aumento del margine di profitto del processo di mining (ad Hash rate e “Difficoltà” costante; quest'ultimo è un parametro che verrà discusso nel paragrafo successivo). Ciò porta l'interessamento:

- da parte di nuovi attori di entrare a far parte del palcoscenico del mining;
- da parte degli attori preesistenti di incrementare gli sforzi computazionali con l'introduzione di nuove macchine.

Il tutto si concretizza con un aumento dell'Hash rate globalmente generato che però, a sua volta, porta ad una riduzione dei margini di profitto a causa dell'aumento quasi contemporaneo del parametro “Difficoltà”. Alla fine, viene a crearsi una sorta di equilibrio che porta man mano all'esclusione dei miner con minore efficienza, i cui ricavi non riescono a coprire i costi.

3.4.4 Difficoltà

La **Difficoltà** è un parametro dinamico che sta ad indicare quanto è difficile trovare un blocco rispetto ad una condizione di riferimento (*Difficoltà* pari a 1) [46].

La *Difficoltà* può essere espressa dalla seguente equazione [34]:

$$\text{Difficoltà attuale} = \frac{\text{Target blocco Genesi}}{\text{Target blocco attuale}} \quad (9)$$

Dalla (9) risulta che più piccolo è il *Target del blocco attuale* e maggiore sarà il valore di *Difficoltà attuale*; la riduzione del Target, infatti, equivale ad una minore probabilità, a parità di sforzo computazionale, di trovare la soluzione al problema (oppure ad una stessa probabilità se aumenta proporzionalmente lo sforzo computazionale).

È stato detto nel paragrafo 3.2.2 che l'unico blocco che ha difficoltà pari a 1 è il blocco genesi, il cui valore *Target* è 00000000ff (in esadecimale).

Per il calcolo del nuovo valore di “Difficoltà” viene utilizzata la seguente equazione ³:

$$\begin{aligned} \text{Difficoltà attuale []} &= \text{Difficoltà precedente []} \cdot \\ &\cdot \frac{\text{Tempo generazione ultimi 2016 blocchi [min]}}{20,160 \text{ [min]}} \end{aligned} \quad (10)$$

dove 20,160 [min] è il tempo che impiegherebbero 2,160 blocchi per essere generati se ognuno di loro venisse creato esattamente ogni 10 minuti.

Una volta che 2016 blocchi, dopo il precedente cambiamento di Difficoltà, sono stati minati, viene calcolato il nuovo valore di Difficoltà dall’equazione precedente e sequenzialmente, dalla (9), si ricava il valore Target del blocco attuale che definirà il nuovo valore di soglia Target:

$$\text{Target blocco attuale} = \frac{\text{Target blocco Genesi}}{\text{Difficoltà attuale}} \quad (11)$$

Di seguito viene rappresentato l’andamento del valore di Difficoltà negli ultimi 5 anni:

³ Il primo cambiamento di Difficoltà è stato eseguito nel blocco 32,256 il 30 Dicembre 2009; il nuovo valore di Difficoltà è stato di 1.18

3. Bitcoin

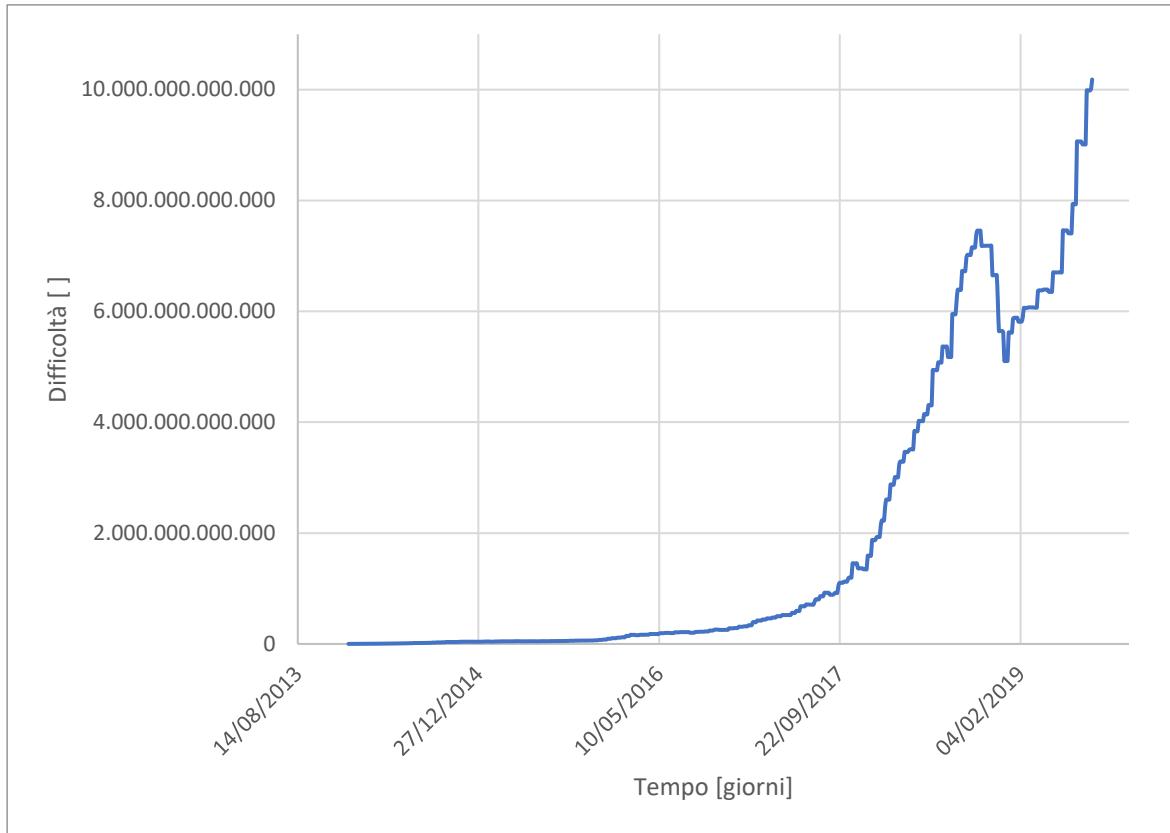


Figura 3.15: Andamento Difficoltà rete Bitcoin nel tempo a partire dal 2014, in data 24 agosto 2019 [45]

Dalla Figura 3.15 si nota che anche l’andamento della Difficoltà, insieme all’Hash rate e al prezzo di bitcoin, è esponenziale nel tempo.

Al fine di mantenere la frequenza di generazione di un blocco costante (1 blocco generato ogni 10 minuti), essendo l’Hash rate una variabile molto volatile, la Difficoltà viene regolata periodicamente ogni 2016 blocchi, ossia 2 settimane circa: questo processo viene chiamato *Retargeting*. [25] A causa di un errore nel client Bitcoin Core originale, la calibrazione della difficoltà si basa però sul tempo totale dei precedenti 2,015 blocchi.

Per evitare la volatilità estrema nella Difficoltà, la regolazione del retargeting deve essere inferiore a un fattore di quattro ad ogni ciclo. Se la regolazione della difficoltà richiesta fosse maggiore di un fattore di quattro, l’ulteriore aggiustamento verrebbe effettuato nel successivo periodo di retargeting, in quanto lo squilibrio persisterebbe nei successivi 2.016 blocchi.

3.4.5 Efficienza

Un parametro utilizzato per misurare le prestazioni dei miner è l'efficienza.

Essa può essere espressa dalla seguente equazione:

$$\text{Efficienza} \left[\frac{\text{J}}{\text{Th}} \right] = \frac{\text{Potenza consumata [W]}}{\text{Hash rate generato} \left[\frac{\text{Th}}{\text{s}} \right]} \quad (12)$$

Risulta altrettanto comune misurare l'efficienza in $\left[\frac{\text{J}}{\text{Gh}} \right]$.

Contrariamente al significato che viene comunemente dato al termine “efficienza”, nel contesto del mining, al diminuire di questo parametro tende ad aumentare la produttività: un maggior Hash rate generato, a parità di potenza consumata, porta a maggiori profitti.

Gli elevati profitti che si sono palesati in questo nascente settore industriale hanno portato diverse aziende (Bitmain, Innosilicon, MicroBT, etc) ad investire ingenti quantità di denaro nel settore della ricerca al fine di ottenere miner sempre più performanti; in Figura 3.16 si può vedere l'avanzamento tecnologico avuto dagli ASIC di Bitcoin negli ultimi anni, considerando un campione di 78 Asic di Bitcoin, le cui caratteristiche tecniche sono disponibili sul sito asicminervalue.com (viene evidenziata la linea di tendenza esponenziale con $R^2 = 0,7362$).

3. Bitcoin

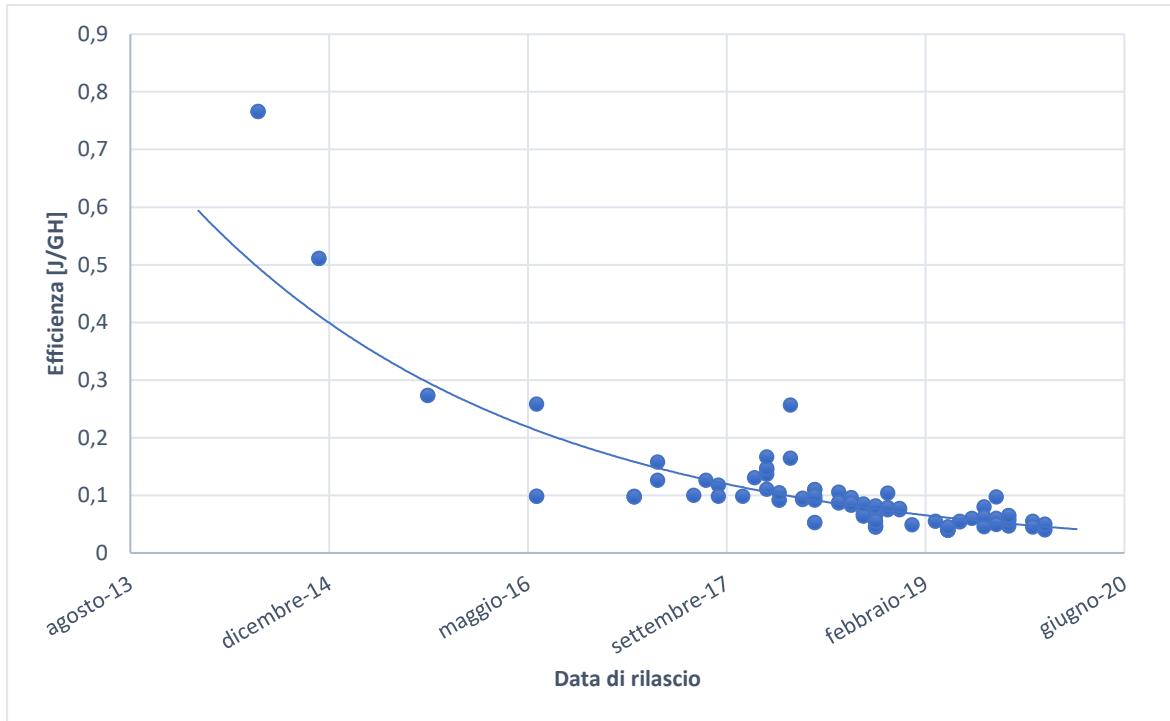


Figura 3.16: Andamento di efficienza nel tempo degli ASIC di Bitcoin

L’evoluzione tecnologica dell’industria del mining segue la prima Legge di Moore [47], la quale stabilisce che la densità di calcolo (il numero di transistor nei processori) raddoppia all’incirca ogni 18 mesi; il limite di questa legge sarebbero data solo dal raggiungimento dei limiti fisici delle dimensioni dei transistor, al di sotto dei quali si genererebbero effetti parassiti indesiderati di natura quantistica nei circuiti elettronici.

3.4.6 Diffusione a livello industriale e implicazioni sociopolitiche

A partire dal 2013 la regione agricola semiarida nota come bacino del Mid-Columbia, grazie alla presenza di 5 dighe idroelettriche installate sul fiume Columbia e alla relativa enorme eccedenza di energia idroelettrica, iniziò a divenire meta di ambiziosi “minatori” di bitcoin che volevano sfruttare il bassissimo prezzo dell’energia elettrica del sito. [48]

Una delle prime cittadine della zona ad essere insediate furono Wenatchee (vedi Figura 3.17) che, in breve, raggiunse un quarto di tutta la capacità estrattiva mondiale di bitcoin.

L'enorme diffusione di questa attività a livello mondiale portò, però, la sua quota ad un valore inferiore all'1% solo a metà del 2014.

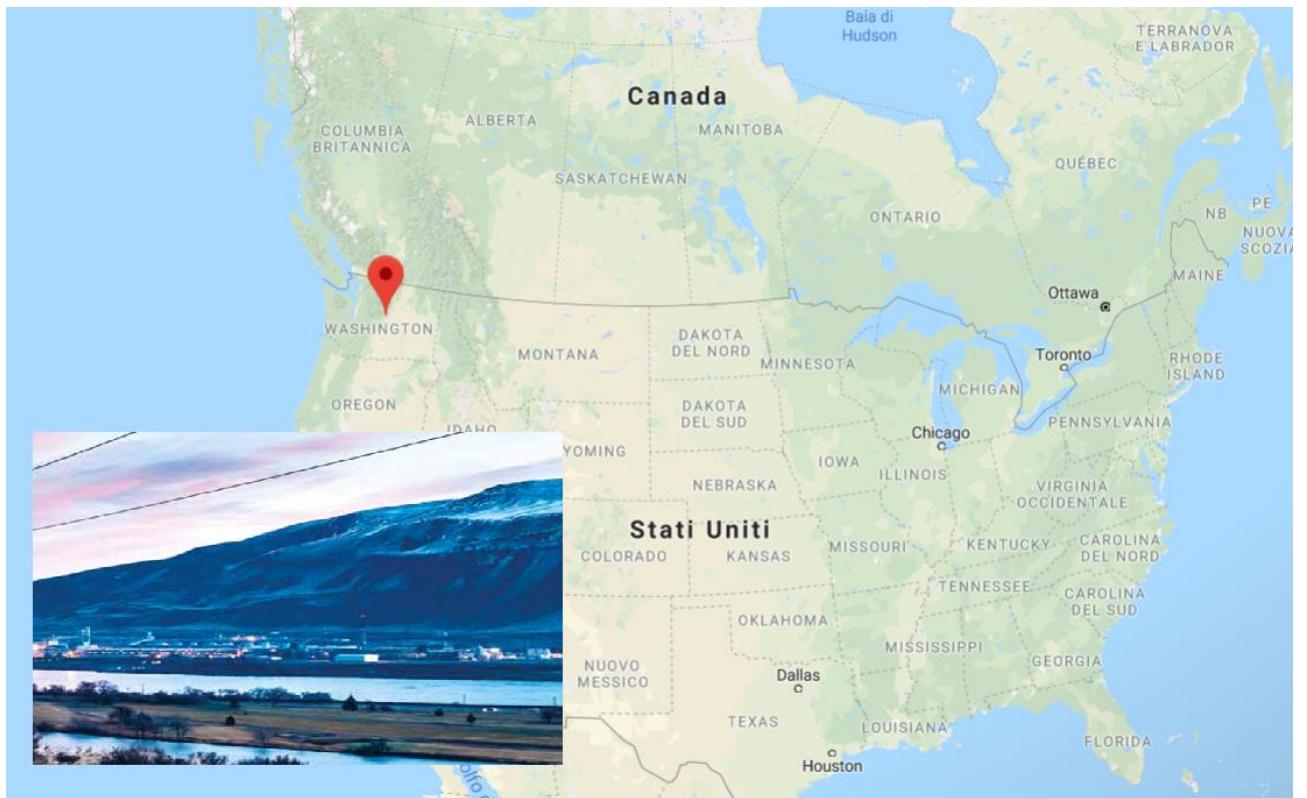


Figura 3.17: Wenatchee, Stati Uniti

Nel tempo sono nati contrasti fra i minatori e i residenti, non solo perché i minatori coi loro server spesso illegali mandavano in tilt le reti elettriche, ma anche per la controversa visione futuristica di questa attività: gli scettici erano preoccupati per l'impatto che questo elevato consumo avrebbe potuto avere sulle tariffe locali. Per decenni, infatti, l'80% dell'energia prodotta complessivamente dalle cinque dighe presenti nel bacino è stata esportata a prezzi elevati, con enormi vantaggi economici per il territorio; con l'avvento del mining, invece, la maggior parte di essa verrebbe utilizzata per soddisfare il fabbisogno interno.

3. Bitcoin

Il rischio che quindi, in generale, potrebbe palesarsi per i territori adiacenti alle zone sfruttate dal mining industriale sarebbe quello di un possibile aumento delle tariffe energetiche, al fine di compensare i possibili mancati introiti.

Bisognerà inoltre valutare l'impatto energetico non solo a livello locale ma anche sull'intera regione; le istituzioni dovranno infatti far fronte ad ingenti investimenti in nuove sottostazioni, cavi di trasmissione e altre infrastrutture necessarie a reggere questi enormi carichi.

Se da una parte ci sono molti gli scettici, dall'altra non mancano però anche gli entusiasti locali del mining: essi ritengono che queste zone avranno l'occasione di diventare tra i principali centri della prossima rivoluzione tecnologica, fonte di lavoro ben retribuito e prosperità economica; gli oneri sulle concessioni per il potenziamento dei server potrebbero bilanciare qualsiasi perdita dovuta a una riduzione nella vendita dell'energia in eccedenza. Lo sviluppo di una zona industriale porterà inoltre ad un maggiore gettito fiscale.

Oggi le industrie di mining sono prevalentemente situate in 2 tipologie di regioni [49] (vedi *Figura 3.18*):

1. quelle dove si ha la possibilità di accedere ad abbondanti fonti di energia **idroelettrica** e in particolare dove essa è *sottoutilizzata*: le principali sono Scandinavia (Norvegia e Svezia), il Caucaso (Georgia, Armenia, Iran), Nord-Ovest Pacifico (Oregon, Washington, British Columbia), Est Canada (Quebec, Newfoundland and Labrador), Sud-Ovest Cina (Sichuan, Yunnan);
2. quelle dove si ha un mix energetico produttivo di idrocarburi fossili, nucleare, solare ed eolico: le principali sono l'Iran, dominato da gas naturale e il Nord Cina (Xinjiang, Inner Mongolia), dominata per la maggior parte da carbone ed in minor parte da eolico.

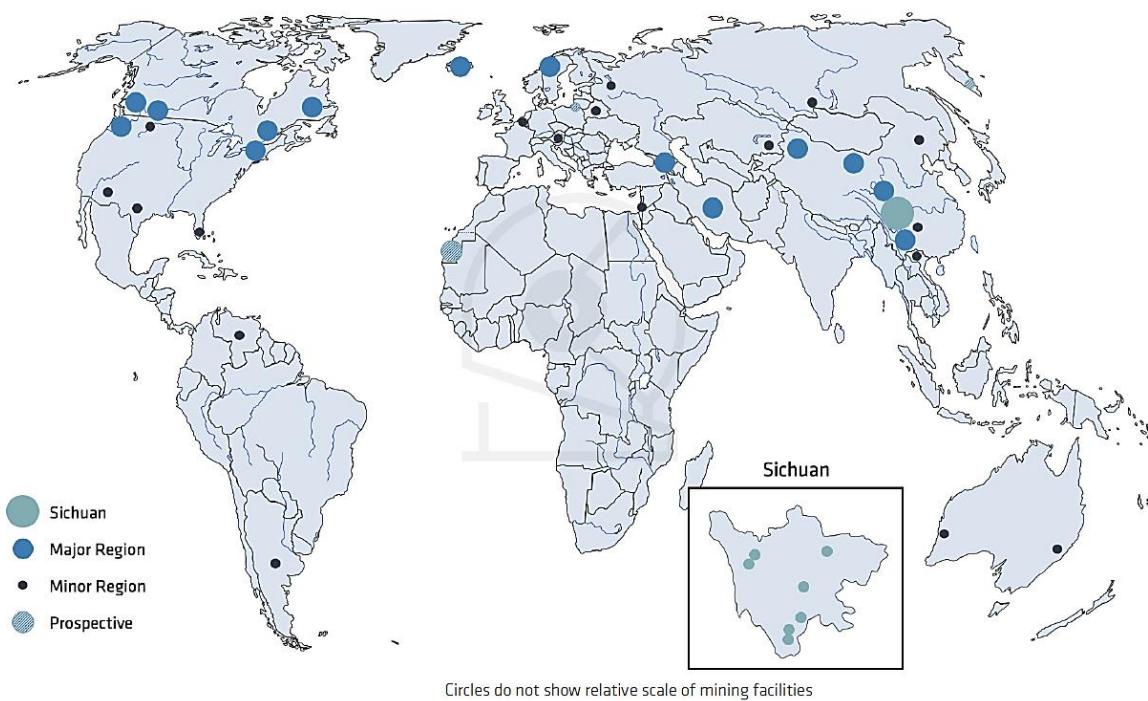


Figura 3.18: Mappa del mondo che mostra le regioni dove si sta sviluppando il mining di bitcoin [49]

Si è stimato che il 60% del mining totale (vedi Tabella 3.2) avviene in Cina e che la regione del Sichuan da sola produce il 50% dell'Hash rate globale [49]. Si è inoltre notato che la distribuzione di mining tra le regioni interne della Cina varia marginalmente durante l'anno; probabilmente ciò accade perché durante la stagione delle piogge (da maggio a settembre), chiamata localmente “Fengshui”, i miner localizzati nel Nord della Cina trasferiscono parte della loro attrezzatura nelle regioni del Sud-Ovest della Cina, con lo scopo di sfruttare la maggior disponibilità di energia idroelettrica a bassissimo prezzo (fino a 2,5 c\$/kWh); una migrazione contraria avverrebbe invece nella stagione secca, grazie anche all'abbondanza di energia solare ed eolica di questo periodo nel Nord della Cina.

3. Bitcoin

Region	Global Mining Share
Sichuan	50.0%
Relevant Remaining China	10.0%
Relevant Non-Chinese Regions	35.0%
Rest of World	5.0%
Global Total	100.0%

Tabella 3.2: Distribuzione del mining globale

3.4.7 Impatto ambientale

Il mining di Bitcoin tende a svilupparsi soprattutto nelle regioni dove esistono infrastrutture sottoutilizzate che generano energia rinnovabile [49] (es. grandi impianti idroelettrici in zone scarsamente abitate), comportando un duplice vantaggio: il completo sfruttamento di determinati impianti di energia rinnovabile e la possibilità di progettare e sviluppare impianti di energia rinnovabile in luoghi dove precedentemente risultava antieconomico.

In generale risulta che sul totale dell'energia elettrica utilizzata per le operazioni di mining, il 74,1% (Giugno 2019) deriva da fonti rinnovabili mentre solo il restante 25,9% deriva da fonti non rinnovabili (nucleare e idrocarburi fossili). Vedi Tabella 3.3.

Region	Renewables Penetration	Share of Renewables for Mining	Share of Fossil/Nuclear for Mining
Sichuan	90.1%	45.1%	5.0%
Relevant Remaining China	43.6%	4.4%	5.6%
Relevant Non-Chinese Regions	68.0%	23.8%	11.2%
Rest of World	18.2%	0.9%	4.1%
Global Total	74.1%	25.9%	

Tabella 3.3: Penetrazione delle rinnovabili nel mining globale

Essendo l'industria del mining di bitcoin prevalentemente privata, vista la sua segretezza non è semplice stimare l'effettivo mix energetico; è preferibile quindi inserire un valore di incertezza (ad esempio del +/- 10%) sui dati stimati.

La frazione di energia rinnovabile potrebbe però leggermente diminuire se:

- continuasse il recente sviluppo di mining in Iran (dipendente quasi interamente da gas e petrolio);
- in alcune regioni in cui la frazione delle rinnovabili risulta la quasi totalità dell'energia elettrica prodotta si iniziassero ad alzare muri legislativi contro il mining, tali da incentivarne la delocalizzazione (come sta avvenendo in Oregon).

3.5 Teoria monetaria

Un' emissione monetaria periodicamente fissa nel tempo e quantitativamente in diminuzione porta la valuta ad essere intrinsecamente deflazionaria, ossia che con il passare del tempo tenderà ad assumere sempre più maggior potere d'acquisto.

Per una valuta fiat, con la possibilità di stampare in qualsiasi momento nuova moneta, è molto difficile entrare in una spirale deflazionaria.

Bitcoin, grazie alla sua scarsità in ambito digitale, assume quindi le sembianze più di un bene rifugio che quelle di moneta; può essere difatti visto come “oro digitale” [50]. Le sue caratteristiche abilitano difatti la realizzazione di una moneta stabile nel potere d'acquisto (come potrebbe essere in un futuro *Libra*, la stable coin di Facebook) che utilizza proprio Bitcoin come bene riserva.

4 Regolazione del processo di Mining entro una UVAC

4.1 Premessa

Le sempre più stringenti politiche ambientali, richiedenti una quota sempre più grande di energia generata da fonti rinnovabili, hanno portato al rapido aumento della produzione da impianti a fonte rinnovabile non programmabile (FRNP), in particolare eolico e fotovoltaico, che ha causato una variazione radicale del profilo della domanda “residua”. Essa è diminuita significativamente soprattutto in concomitanza delle ore di massima produzione fotovoltaica, comportando talvolta la necessità di evadere l'eccesso di generazione; inoltre è progressivamente aumentata la rampa serale, per la quasi contemporanea diminuzione della produzione fotovoltaica e l'aumento dei carichi. In modo analogo anche nelle ore mattutine.

Questo nuovo profilo di domanda residua ha determinato l'esigenza, per il sistema di trasmissione, di richiedere nuovi servizi per il dispacciamento, in particolare l'incremento del fabbisogno di riserva (secondaria e terziaria) per effettuare bilanciamenti in tempo reale, sia in aumento (riserva a salire) sia in diminuzione (riserva a scendere), e l'incremento delle chiamate in avviamento delle unità di produzioni termoelettriche per la costituzione dei margini di riserva; il gestore di rete di trasmissione, infatti, necessita sempre più di risorse (riserve) rapide all'attivazione ed approvvigionabili, all'occorrenza, in tempi brevi.

La delibera 300/2017/R/eel ha previsto una prima apertura del mercato dei servizi di dispacciamento (MSD) alle unità di produzione ad oggi non ancora abilitate, inclusi i sistemi di accumulo; è iniziata quindi una fase sperimentale, tramite l'avvio di progetti pilota, al fine di rendere disponibile sin da subito nuove risorse di dispacciamento. I primi progetti pilota,

4. Regolazione del processo di Mining entro una UVAC

avviati a partire dal 2017, hanno consentito di testare la partecipazione volontaria al MSD delle UVAC (Unità Virtuali Abilitate di Consumo) e delle UVAP (Unità Virtuali Abilitate di Produzione); a partire dal 1° novembre 2018, in seguito alla deliberazione 422/2018/R/eel, i progetti pilota UVAC e UVAP sono confluiti nel progetto pilota UVAM. [19] [15]

4.2 Data Center di mining

Si definisce “**Data Center**” un centro per elaborazione di dati (CED), ossia un impianto destinato a ospitare macchine di processo (server) all’interno di sale opportunamente segregate (Dark Room); nel contesto elettrico attuale, i Data Center costituiscono un carico importante ai fini dell’utilizzo finale dell’energia elettrica.

Essi sono generalmente collegati a nodi della rete contraddistinti da un’elevata qualità del servizio e sono dotati di una connessione dati ad elevate prestazioni.

I Data Center di maggiori dimensioni sono connessi alla rete di distribuzione MT e alimentati in condizioni di emergenza da **UPS** e **Gruppi Elettrogeni**:

- **UPS** (*Uninterruptible Power Supply*) o gruppo statico di continuità è un apparecchio costituito da almeno tre parti principali: un primo *convertitore AC* che, grazie a un raddrizzatore e a un filtro, converte la tensione alternata della rete elettrica in tensione continua; una *batteria*, o più batterie, in cui viene immagazzinata l’energia fornita dal primo convertitore; un secondo *convertitore CA* o *inverter* che, prelevando energia dal raddrizzatore o dalle batterie in caso di mancanza della rete elettrica, fornisce corrente al carico collegato [51].

Esso permette, in caso di buchi di tensione, di mantenere la forma d’onda di tensione esente da disturbi e, in seguito alla mancanza della rete esterna, di sopperire per un brevissimo periodo al ritardo dettato dalle tempistiche di avvio dei gruppi elettrogeni. Viene dimensionato per il carico critico della Server farm.

- Il **Gruppo Elettrogeno (GE)** è una macchina costituita da un motore termico accoppiato ad un generatore elettrico (alternatore) che trasforma in cascata l’energia

termica di combustione in energia meccanica ed infine in energia elettrica; essi sono dimensionati per il carico totale e sostituiscono completamente la rete esterna per un tempo variabile in funzione della criticità del sito.

Il profilo di carico di un Data Center è generalmente costante e il gradiente di modulazione richiesto dalla prestazione di flessibilità (circa 0.3 MW/min) è compatibile con le caratteristiche tecniche dei macchinari impiegati.

Qualora dovesse verificarsi una chiamata durante un fenomeno interruttivo sulla rete di distribuzione, il servizio di flessibilità non potrà essere fornito; questa eventualità risulta tuttavia trascurabile, dato che unità collegate alla rete MT integrate con UPS subiscono pochissime interruzioni senza preavviso all'anno, per una durata complessiva inferiore all'ora.

Il Data Center di mining o *mining farm* è costituito da hardware specializzati nello svolgere il processo di mining, processo altamente energivoro il cui scopo principale è quello di coniare nuovi bitcoin e rendere la rete Bitcoin sicura e affidabile.

Il processo di mining è stato svolto inizialmente (vedi 3.4.6 Diffusione a livello industriale e implicazioni sociopolitiche) attraverso l'utilizzo di CPU, in un contesto perlopiù casalingo; a partire dal 2013 ha iniziato a diffondersi su larga scala e a utilizzare hardware sempre più efficienti, passando dai GPU e FPGA ai più recenti ASIC e divenendo una vera e propria attività industriale. Ad oggi, i Data Center di mining sono ubicati in capannoni industriali o spazi appositamente dimensionati, in aree geografiche dove i costi di corrente elettrica permettono di massimizzare i ricavi. La profitabilità di questa attività deriva essenzialmente, infatti, dal *costo di corrente elettrica*; l'accesso a grandi quantità di energia elettrica non sfruttata (ad esempio in Cina o in Canada) permette di ridurre notevolmente questo costo. L'attività di mining non può quindi essere distribuita ovunque nel mondo, ma solo nelle zone in cui si ha un basso costo di energia elettrica.

I ricavi derivano dal controvalore fiat dei bitcoin guadagnati tramite gli sforzi computazionali di hardware chiamati “miner” (vedi 3.4.2 Mining Pool). La politica di gestione dei bitcoin varia da azienda a azienda; il suo valore viene comunque determinato dalle normali regole del mercato di compravendita.

4. Regolazione del processo di Mining entro una UVAC

La corrente elettrica che assorbono i miner serve sia per il raffreddamento, tramite ventole preinstallate, delle componenti elettroniche di cui sono costituite, sia per lo svolgimento dei calcoli computazionali. Una percentuale non trascurabile del costo totale di corrente elettrica di una mining farm (molto arbitrario e funzione anche della temperatura esterna ambiente) è però da imputare al sistema di condizionamento e/o raffreddamento del locale in cui sono installati gli hardware, a causa dell'enorme quantità di calore generato; basti pensare che tutta l'energia elettrica consumata viene convertita in energia termica. Le zone geografiche con un clima tipicamente freddo (es. Islanda, Scandinavia, Canada) risultano quindi preponderanti nella scelta dell'ubicazione di un Data Center di mining.

I Data Center di mining vengono fatti funzionare continuativamente e alla massima potenza per ottenere il massimo profitto nel corso della vita utile dei miner; questi ultimi diventano obsoleti nell'arco di pochi anni, a causa del mercato altamente competitivo in cui si trovano (vedi 3.4.5 Efficienza) e vengono rimpiazzati con hardware di nuova generazione.

4.3 Studio schemi ciclici prezzo Bitcoin

I ricavi del processo di mining derivano essenzialmente, a parità di Hash rate generato dal Data Center di mining, dal valore del prezzo di bitcoin e dall'Hash rate globale della rete Bitcoin. Non è possibile predire l'andamento che questi due parametri assumeranno in futuro ma si è notato che, nel corso della breve storia⁴ del mercato di bitcoin, si è ripetuto ciclicamente un particolare pattern. Nei mercati finanziari, difatti, si tendono a ripetere con una certa frequenza tre fasi cicliche [52], come si può evidenziare in Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3:

⁴ La prima transazione di bitcoin è avvenuta il 3 gennaio 2009 [78]

1. fase accumulativa: il movimento laterale di consolidamento che precede l'inizio di un impulso rialzista (SUPPORT); durante questa fase gli investitori accumulano posizioni perché valutano convenienti i prezzi del mercato⁵;
2. fase di trend: i prezzi, sostenuti da un deciso incremento di volumi, superano un importante livello di resistenza (BREAKOUT) e proseguono verso una direzione ben precisa, al rialzo (UP) o al ribasso;
3. fase distributiva: il movimento laterale di consolidamento che precede l'inizio di un impulso ribassista (DOWN e LOWER LOWS); durante questa fase gli investitori liquidano progressivamente le posizioni precedentemente acquisite durante le due fasi precedenti.



Figura 4.1: Fase ciclica prezzo di Bitcoin 2011-12 [53]

⁵ Si può notare che verso la fine del 2018 si è verificata la cosiddetta *bear-trap* o “trappola per orsi” [52], ossia una falsa rottura al ribasso in cui i prezzi sono scesi al di sotto di importanti supporti grafici e poi all'improvviso rimbalzati con una certa decisione (tra aprile e luglio 2019 il prezzo di Bitcoin è “rimbalzato” superando la quota di 13k [\$]).

4. Regolazione del processo di Mining entro una UVAC



Figura 4.2: Fase ciclica prezzo di Bitcoin 2014-16 [53]



Figura 4.3: Fase ciclica prezzo di Bitcoin 2017-192 [53]

Come si può vedere nei grafici di Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3, il ciclo principale che descrive l'andamento del prezzo di bitcoin si estende per un periodo di circa 2 anni.

Spostando ora l'attenzione sugli hardware di mining, si definisce “vita utile” di un hardware di mining (miner) quel parametro che misura il tempo che intercorre tra la sua data di rilascio commerciale e il momento in cui non genera più profitto. Esso, però, non è un parametro

assoluto; il profitto di un Data Center di mining, infatti, dipende da diversi fattori, i cui principali sono: il costo dell’energia elettrica, il prezzo di bitcoin e l’Hash rate globale della rete Bitcoin (indirettamente quindi la Difficoltà).

Ragionando a parità di costo di corrente elettrica, la profittabilità di un miner sarà quindi influenzata principalmente dalle sole variabili di prezzo di bitcoin e Hash rate globale della rete Bitcoin, tale per cui i miner attivi che possiedono un’efficienza inferiore ad una determinata soglia critica (variabile nel tempo e diversa per ogni valore di costo della corrente elettrica), non risultano più essere profittevoli e devono quindi essere spenti (si parla di *shutdown* dei miner); può succedere che, in seguito ad esempio ad un’improvvisa riduzione del prezzo di bitcoin e/o rapido aumento dell’Hash rate globale, si raggiunga questa condizione prima della fine della vita utile previsionale; ciò non significa che i miner in questione debbano essere immediatamente smantellati. Potranno difatti essere spenti solo momentaneamente, fino a che non si ristabiliranno nuovamente le condizioni di profitto positivo.

Un eventuale aumento progressivo dell’Hash rate globale nel tempo, se non seguiti da un proporzionale aumento del prezzo di Bitcoin, porterebbe però ad un aumento di frequenza e durata di questi eventi critici. La vita utile di un miner o di un Data Center di mining, a parità di efficienza tecnologica e costo dell’elettricità, dipenderà quindi dalle scelte aziendali riguardanti le tempistiche e modalità di shutdown.

Osservando l’andamento in *Figura 4.1*, si può notare che nell’ultimo ciclo (da metà 2017 ad oggi), l’*Hash rate* abbia assunto un valore continuamente crescente nel tempo, anche nei periodi di forte crollo del prezzo di Bitcoin; eccezione per gli ultimi mesi della fine del 2018 dove si è riscontrata una diminuzione, anche se limitata.

4. Regolazione del processo di Mining entro una UVAC



Figura 4.1: Andamento dell'ultimo ciclo del prezzo di bitcoin (su scala decimale) e di Hashrate globale (su scala logaritmica) [45]

Sia in Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3, che in Figura 4.4, si può notare come l'andamento del prezzo di bitcoin durante un ciclo di mercato sia contraddistinto da rapide ascese che, per piccole variazioni di Hashrate globale, possono portare ad elevati profitti (sempre ragionando a parità di costo di corrente elettrica); ad esse, però, sono sempre associati altrettanto rapidi crolli, che portano invece a profitti completamente ridimensionati se non addirittura negativi. Durante il 2018 il susseguirsi di LOWER LOW (VEDI Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3), ossia di fasi in cui i valori minimi toccati dalla curva del grafico diminuiscono man mano che vengono raggiunti, si è assistito ad un progressivo shutdown dei miners meno profittevoli. La variabile aleatoria che può portare più facilmente l'insorgenza di una condizione di profitto negativo è difatti il prezzo del bitcoin perché molto più volatile dell'Hash rate globale. Gli eventi critici si possono verificare in concomitanza del crollo dei prezzi di bitcoin.

4.4 Partecipazione a MSD

Il Data Center è un impianto di consumo che grazie alle sue caratteristiche è particolarmente adatto a fornire servizi di flessibilità alla rete elettrica.

Con l'apertura da parte di Terna all'approvvigionamento, per il tramite del Mercato del Servizio di Dispacciamento (MSD), delle risorse da unità finora non abilitate (unità di produzione non rilevanti, ivi sistemi di accumulo, unità di carico) al fine di perseguire l'obiettivo di una rete elettrica più sicura e affidabile, i Data Center hanno avuto la possibilità di fornire un servizio di flessibilità in cambio di una retribuzione.

Il Data Center di mining però, complice una potenza installata limitata⁶ e quasi interamente ubicata nell'intorno di impianti idroelettrici, non ha fornito alcun servizio di regolazione nei vari progetti pilota che si sono susseguiti a partire dal 2017. Al di là del legittimo obiettivo di massimizzazione dei profitti, che spinge gli industriali ad investire solo nei contesti energetici in cui si riscontrano i minimi costi di energia elettrica, risulta interessante valutare la fattibilità tecnico-economica di utilizzo del Data Center di mining come ulteriore mezzo di approvvigionamento di risorse atte a garantire il buon funzionamento della rete elettrica nazionale, rimettendo in discussione la generale e preliminare valutazione di considerare non fattibile qualsiasi azione che comporti, anche se solo per un breve periodo, il distacco di un Data Center di mining da una alimentazione elettrica.

In seguito alla nuova apertura prevista da ARERA, la condizione necessaria per la partecipazione al MSD da parte di una unità di consumo è quella di essere aggregata, entro perimetri geografici definiti da Terna, ad una UVAC (*Unità Virtuali Abilitate di Consumo*) o ad una UVAM (*Unità Virtuali Abilitate Miste*), con una quota minima di potenza flessibile e interrompibile con preavviso fornita dall'intero aggregato pari a 1 MW (vedi 2.4.2.3 UVAC e 2.4.2.4 UVAM).

⁶ L'Italia è caratterizzata da un elevato costo della corrente elettrica, condizione che ha limitato lo sviluppo dell'attività di mining, richiedente fra l'altro un importante investimento infrastrutturale e di macchine.

4. Regolazione del processo di Mining entro una UVAC

Si è quindi studiato il caso in cui un Data Center di mining venga aggregato come UVAC e partecipi ad un ipotetico progetto pilota; anche se i progetti pilota UVAC non sono più previsti, in seguito al confluire dei progetti pilota UVAC e UVAP nei progetti pilota UVAM, risulta interessante una sua simulazione al fine di cogliere elementi utili per un futuro coinvolgimento di Data Center di mining a questo servizio di flessibilità; si vuole ricordare, infatti, che i progetti pilota fanno parte di una fase sperimentale operata su iniziativa di Terna in vista di future regolamentazioni in ambito di flessibilità.

5 Metodologia di analisi proposta

5.1 Obiettivo

Si vuole valutare l'impatto economico che un Data Center di mining avrebbe se venisse qualificato come UVAC (Unità Abilitata Virtuale di Consumo) e, sotto le regolamentazioni dei progetti pilota UVAC, fornisse un servizio di flessibilità alla rete di trasmissione. Quando richiesto da parte del Gestore di rete (TERNA) e in cambio di una remunerazione (fissa e variabile), il Data Center ridurrebbe, solo per periodi prestabiliti, il prelievo di potenza assorbita dalla rete, corrispondente ad un analogo incremento di immissione, offrendo un servizio nella modalità “a salire” e permettendo l'approvvigionamento di risorse al fine di:

- partecipare alla creazione di riserva terziaria nella *fase di programmazione* (del Mercato dei Servizi di Dispacciamento o MSD);
- fornire il servizio di Bilanciamento in tempo reale nella *fase di bilanciamento* (del MSD).

Il soggetto titolare dell'UVAC dovrà inviare quotidianamente un'offerta al Gestore della rete, comprendente il valore di prezzo e di quantità di energia elettrica che intende fornire come servizio di regolazione.

Verranno confrontati i risultati economici ottenuti tramite il calcolo del **NCF** (*Net Cash Flow*) di ipotetici investimenti in Data Center di mining che forniscano il servizio di flessibilità alla rete di trasmissione e il cui inizio di attività corrisponda a determinati momenti critici che si creano all'interno di un tipico ciclo finanziario del prezzo di bitcoin. Il periodo di riferimento dell'investimento coincide con l'ipotetica durata del contratto stipulato con Terna (confronto 6 mesi e 1 anno).

5. Metodologia di analisi proposta

Si farà riferimento ad un modello che simula l'andamento dei risultati delle offerte che il titolare dell'UVAC dovrà mandare quotidianamente durante la fase ex-ante del MSD; verrà inoltre calcolato il valore di *offerta minima* ossia il minimo valore di offerta da presentare al MSD tale che una sua ipotetica accettazione e attivazione permetterebbe il recupero dei mancati ricavi che il Data Center avrebbe con l'interruzione della sua attività. Il valore di offerta minima però, per sua natura, non porta ad alcun profitto; risulterà quindi interessante valutare nel successivo capitolo il valore incrementale rispetto a quello di offerta minima che consentirebbe di ottenere il miglior risultato economico in termini di NCF.

5.2 Caso senza regolazione

Si considera “caso senza regolazione” quello che simula il comportamento che avrebbe il Data Center qualora dovesse svolgere solamente la funzione di mining.

Appartenere ad una mining pool che detiene una percentuale importante (anche pochi punti percentuali) del totale dell'Hash rate fornito alla rete Bitcoin permette di eliminare la deviazione standard sui ricavi ottenuti. Si sceglie di fornire l'Hash rate ad una mining pool le cui modalità di remunerazione sono del tipo “*Score*”, ossia riceve dai miner appartenenti alla pool stessa la somma delle commissioni transazionali e del premio Coinbase dei blocchi da loro minati e la redistribuisce, chiedendo una commissione per il servizio fornito, ai miner stessi in proporzione alla media mobile esponenziale (EMA) dell'Hash rate che ciascuno di loro ha effettivamente fornito nel tempo.

Un Data Center di mining non fornisce esattamente e costantemente la potenza computazionale per il quale è stato progettato; si ha una continua variazione attorno al valore desiderato, generalmente del $\pm 5\%$ [54]. L'andamento dell'Hash rate nel tempo può difatti assomigliare a quello visto in *Figura 3.12*.

Non è necessario possedere o simulare i dati di una mining pool virtuale. Grazie alla possibilità di trascurare la deviazione standard, infatti, per un prefissato intervallo temporale i ricavi medi di un Data Center di mining rimangono sempre gli stessi, qualsiasi sia la mining pool asservita (anche se, per relativamente brevi periodi di tempo, il fattore “fortuna” può

comportare una leggera deviazione rispetto ai valori medi statistici); inoltre la scelta del metodo di remunerazione di tipo “*score*” permette di ricevere pagamenti più costanti nel tempo. L’equazione (8) può essere riscritta come:

$$\begin{aligned} \textbf{\textit{Ricompensa}} &= \\ &= \textit{Premio blocco} \cdot (1 - \textit{commissione pool}) \cdot \\ &\cdot \frac{\textit{Hashrate}_{\textit{Data Center}}}{\textit{Hashrate}_{\textit{rete Bitcoin}}} \end{aligned} \quad (13)$$

Dove il “*Premio blocco*” è la somma delle commissioni transazionali e del premio coinbase; la “*commissione pool*” è il valore di commissione che richiede la mining pool per il servizio fornito; “*Hashrate_{Data Center}*” è il valore di Hash rate generato dal Data Center di studio; “*Hashrate_{rete Bitcoin}*” è il valore che il totale delle mining pool e dei miner solitari (chi non si registra alle mining pool e tenta la fortuna minando per conto proprio) si stima forniscano all’interno della rete Bitcoin; esistono numerose altre reti che, sulla falsa riga della rete Bitcoin, utilizzano il processo di Proof of Work per rendere sicura la rete stessa, cambiando magari alcune regole di protocollo e/o la funzione di Hash crittografica. Ad esempio, Litecoin utilizza come algoritmo crittografico lo “scrypt”, le transazioni vengono confermate in media ogni 2.5 minuti e il limite massimo di monete coniabili è pari a 84 milioni; per Bitcoin si ricorda invece essere rispettivamente “SHA256”, 10 minuti e 21 milioni di monete.

L’effettivo valore di Hash rate fornito all’interno di una rete varia continuamente nel tempo ma non è possibile conoscerlo con esattezza perché non esiste un sistema centralizzato che riceve ed elabora questi dati; è possibile però procedere al calcolo del valore medio che esso assume nell’intervallo temporale in cui il parametro “Difficoltà” si mantiene costante. Per la rete Bitcoin, lo si può calcolare attraverso la seguente equazione [55]:

5. Metodologia di analisi proposta

$$\boxed{\text{Hash Rate rete Bitcoin}}_{\text{Difficoltà}} \left[\frac{H}{s} \right] = \frac{\text{Difficoltà []} \cdot 2^{32} \left[\frac{H}{block} \right]}{\text{Tempo medio } \left[\frac{h}{block} \right] \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]} \quad (14)$$

Esso è funzione quindi dei valori assunti dai parametri “*Tempo medio*” e “*Difficoltà*”. Il parametro “Tempo medio” sta ad indicare il tempo medio di chiusura di un blocco nell’intervallo temporale di Difficoltà costante; da protocollo Bitcoin esso dovrebbe risultare pari a 10 [minuti] (0.1667 [ore]). La “*Difficoltà*” (definita nel paragrafo 3.4.4 Difficoltà) è un parametro che assume un andamento a gradino nel tempo; per la rete Bitcoin si verifica una variazione di questo parametro ogni 2016 blocchi minati, ossia 2 settimane circa.

Dal momento in cui viene modificata la Difficoltà, essa viene impostata ad un valore tale che il Tempo medio debba risultar essere pari a 10 minuti; il valore di Hash rate risultante dalla (14) sarebbe quindi quello medio che risulterebbe qualora 2016 blocchi venissero minati successivamente in un tempo medio di 10 minuti ciascuno. Esso sarà inoltre il valore di Hash rate della rete Bitcoin sul quale rapportarsi per il calcolo della ricompensa ottenuta mediamente per un Data Center di mining registrato su una mining pool di grandi dimensioni. Qualora, una volta minati i 2016 blocchi, risulterà un Tempo medio inferiore (superiore) ai 10 minuti, significherà che l’Hash rate medio dell’intervallo temporale considerato è stato maggiore (minore) rispetto a quello preventivato e si provvederà al ricalcolo di un nuovo valore di Difficoltà.

Volendo esprimere l’Hashrate in termine di $\left[\frac{TH}{s} \right]$ e il Tempo medio in termine di $\left[\frac{min}{block} \right]$, l’equazione precedente può essere riscritta come:

$$\begin{aligned}
 \overline{\text{Hash Rate rete Bitcoin}}|_{\text{Difficoltà}} \left[\frac{\text{TH}}{\text{s}} \right] &= \\
 &= \frac{\text{Difficoltà} [] \cdot 2^{32} \left[\frac{\text{H}}{\text{block}} \right]}{\text{Tempo medio} \left[\frac{\text{min}}{\text{block}} \right] \cdot 60 \left[\frac{\text{s}}{\text{min}} \right] \cdot 10^{12} \left[\frac{\text{TH}}{\text{H}} \right]}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Nel periodo temporale in cui il parametro Difficoltà rimane costante, ogni singolo miner della rete, per il tramite di una mining pool, riceve dei pagamenti proporzionali alla potenza computazionale fornita; c'è da considerare che, però, all'aumentare dell' Hash rate fornito alla rete Bitcoin si riduce il tempo medio di chiusura di un blocco e quindi l'intervallo di tempo in cui è possibile risolvere il problema della "Proof of Work" ad un determinato valore di difficoltà e viceversa; siccome si vuole mantenere il "Tempo medio" costante, la variazione di Difficoltà (che avviene in maniera automatica) permette il ripristino del valore di default; in questo modo si mantiene costante nel tempo anche il rapporto tra Difficoltà e Hash rate della rete Bitoin (vedi *Figura 5.1*).

Si può riscrivere la (15) come:

$$\begin{aligned}
 \overline{\text{Difficoltà} []} &= \\
 \overline{\text{Hash Rate rete Bitcoin}}|_{\text{Difficoltà}} \left[\frac{\text{TH}}{\text{s}} \right] &= \\
 &= \frac{\text{Tempo medio} \left[\frac{\text{min}}{\text{block}} \right] \cdot 60 \left[\frac{\text{s}}{\text{min}} \right] \cdot 10^{12} \left[\frac{\text{TH}}{\text{H}} \right]}{2^{32} []}
 \end{aligned} \tag{16}$$

5. Metodologia di analisi proposta

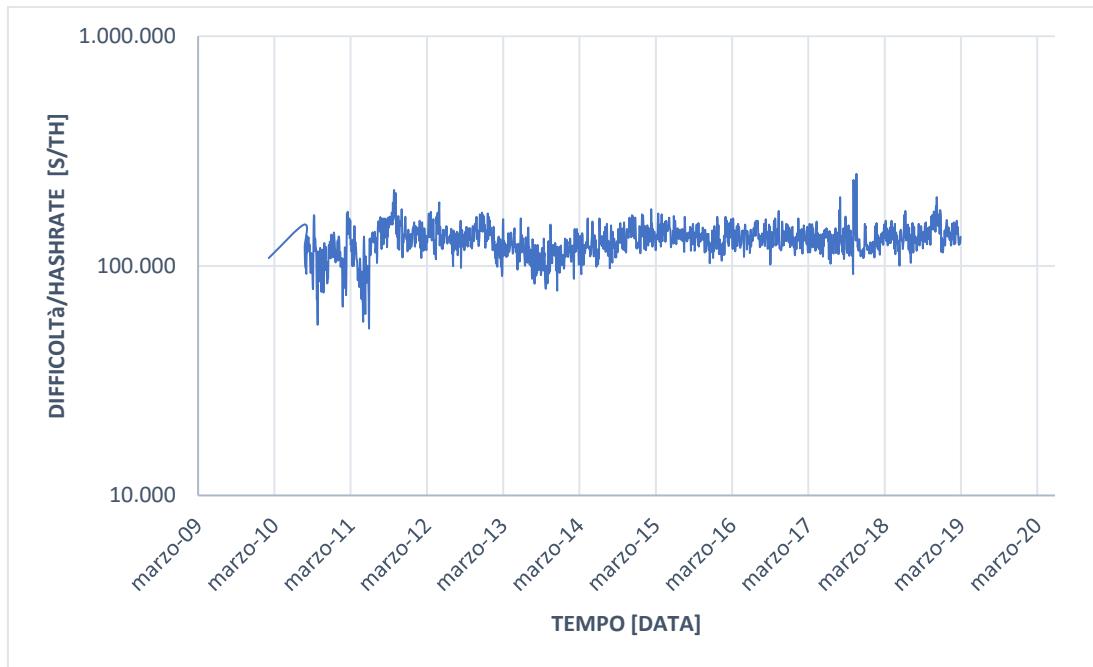


Figura 5.1: Variazione nel tempo del rapporto Difficoltà / Hash rate globale rete Bitcoin [45]

In Figura 5.2 si riporta l'andamento della Difficoltà al variare dell'Hash rate globale della rete Bitcoin. Si nota che si ha un andamento lineare tra la variazione di Hash Rate globale e di Difficoltà.

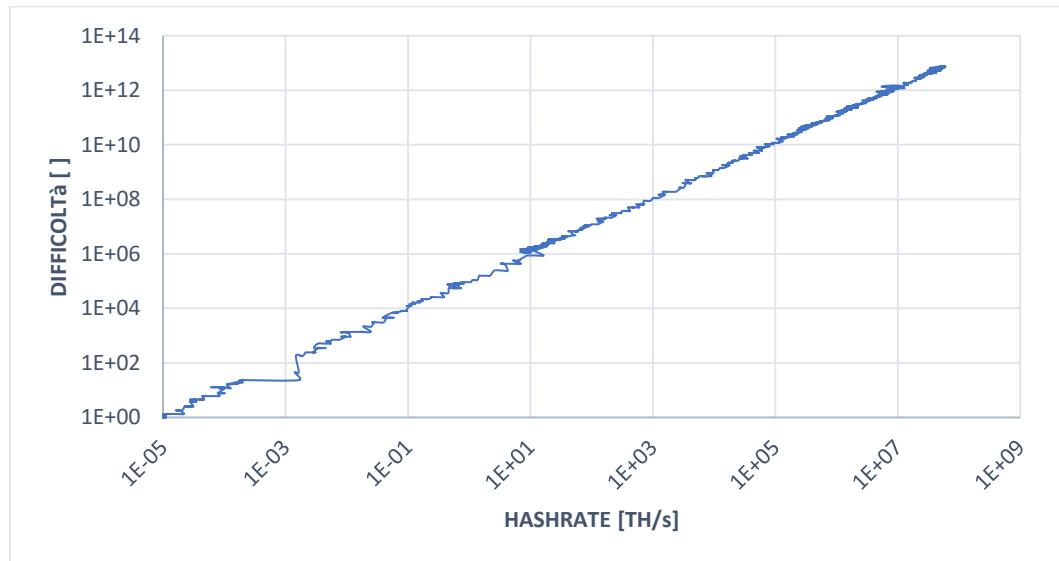


Figura 5.2: Relazione tra Difficoltà e Hash rate globale della rete di Bitcoin [45]

Avendo a disposizione solo dati giornalieri, misurati alle 00:00 (UTC), si è deciso di mantenere il loro valore costante per l'intera giornata di riferimento (dalle 00:00 alle 23:59 del giorno stesso).

Nel mondo delle cryptovalute si tende a ragionare in termini di dollari e la maggior parte dei dati storici utilizzati sono forniti con questa unità di misura; durante i passaggi analitici verranno poi convertiti in euro.

Come politica di trading si è scelto di convertire, pagando un costo di commissione (*fee*), il ricavato giornaliero attraverso una piattaforma exchange; un nuovo valore di conversione euro/dollaro verrà fornito quotidianamente alle 00:00.

Nella simulazione, si ipotizza che:

- venga effettuato l'ordine nei mesi precedenti la data ufficiale di rilascio;
- i miner siano disponibili in quantità tali da poter approvvigionare un Data Center di mining di medie-grandi dimensioni senza ritardi di consegna o cancellamento dell'ordine;
- i tempi di consegna (circa 1 settimana) e di installazione siano pari a 2 mesi [56];
- l'inizio della simulazione coincida con la data di inizio esercizio del Data Center.

Inoltre si stabilisce che la condizione di shutdown provvisorio, ossia di spegnimento temporaneo dei miner (vedi paragrafo 4.3 Studio schemi ciclici prezzo Bitcoin), sia quella che porta i miner ad avere un profitto negativo.

Attraverso i siti delle principali aziende produttrici di miner e il sito asicminervalue.com si sono estrapolati i valori di efficienza e di prezzo di 78 Asic di Bitcoin rilasciati ufficialmente a scopo commerciale a partire dal 2014⁷. Da essi si è ottenuto il grafico di *Figura 3.16* di pagina 82; riportando da quest'ultimo solamente i valori di efficienza che nel tempo hanno progressivamente portato ad una riduzione discretizzata della stessa, si ottiene il grafico di *Figura 5.3*.

⁷ Non si conosce l'effettivo numero totale di modelli di Asic di Bitcoin rilasciati ufficialmente

5. Metodologia di analisi proposta

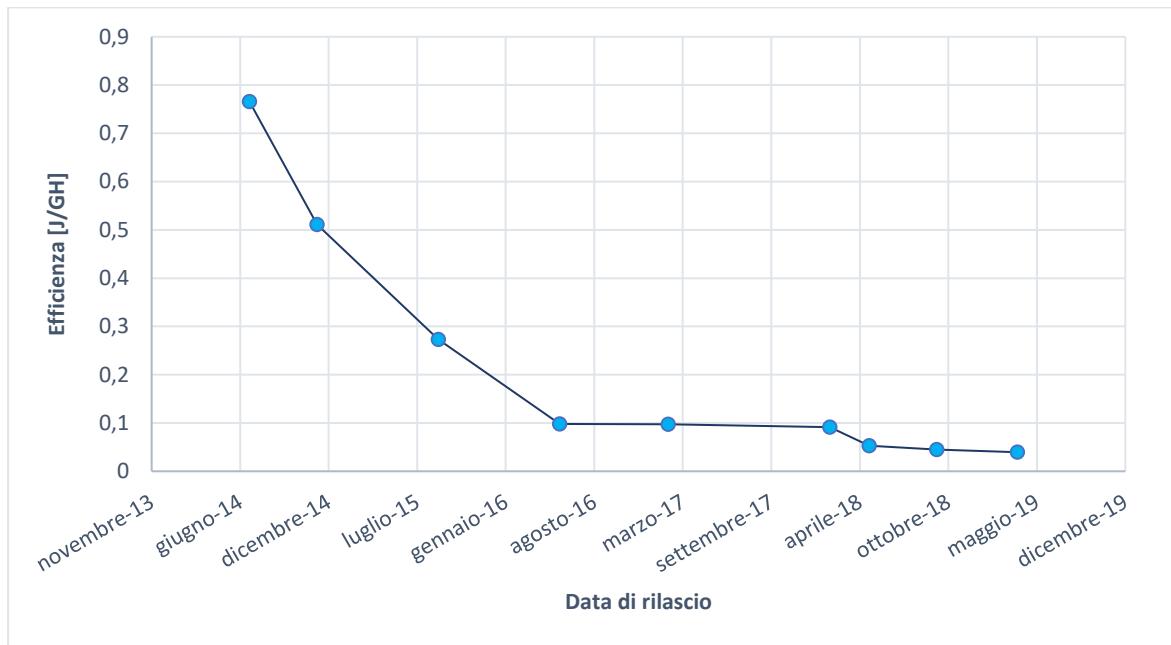


Figura 5.3: Andamento efficienza minima dei miner nel tempo

Da *Figura 5.3* si può notare che l'andamento della variazione dell'efficienza nel tempo sia effettivamente logaritmico; la sua discretizzazione, però, può portare a volte, per un determinato intervallo temporale, ad un miglioramento nella compattezza o densità di potenza per unità di volume del miner ma non ad un miglioramento nella sua efficienza; sempre in *Figura 5.3* si può osservare come si sia ipotizzato lineare l'andamento dei valori minimi di efficienza tra i punti riportati; il luogo di punti dei segmenti che si sono venuti a creare corrisponde ai valori di minima efficienza associati alla data di rilascio commerciale dell'ipotetico miner utilizzato nella simulazione; si vuole difatti simulare un Data Center di mining che possieda le migliori performance possibili, qualsiasi sia la data di avviamento dell'attività.

Considerando i prezzi dei miner venduti attraverso i siti ufficiali delle principali aziende produttrici e ipotizzando un sovrapprezzo sul valore della merce del 4% per le spese di

spedizione (*shipping fee*⁸) e del 25% per le tasse e i dazi doganali, si può calcolare il costo totale che avrebbe l'acquisto di un miner. Rapportando, per ogni singolo miner, il costo totale sulla potenza elettrica richiesta per il normale funzionamento e graficando il valore ottenuto in funzione dell'efficienza, si ottiene la *Figura 5.4*.

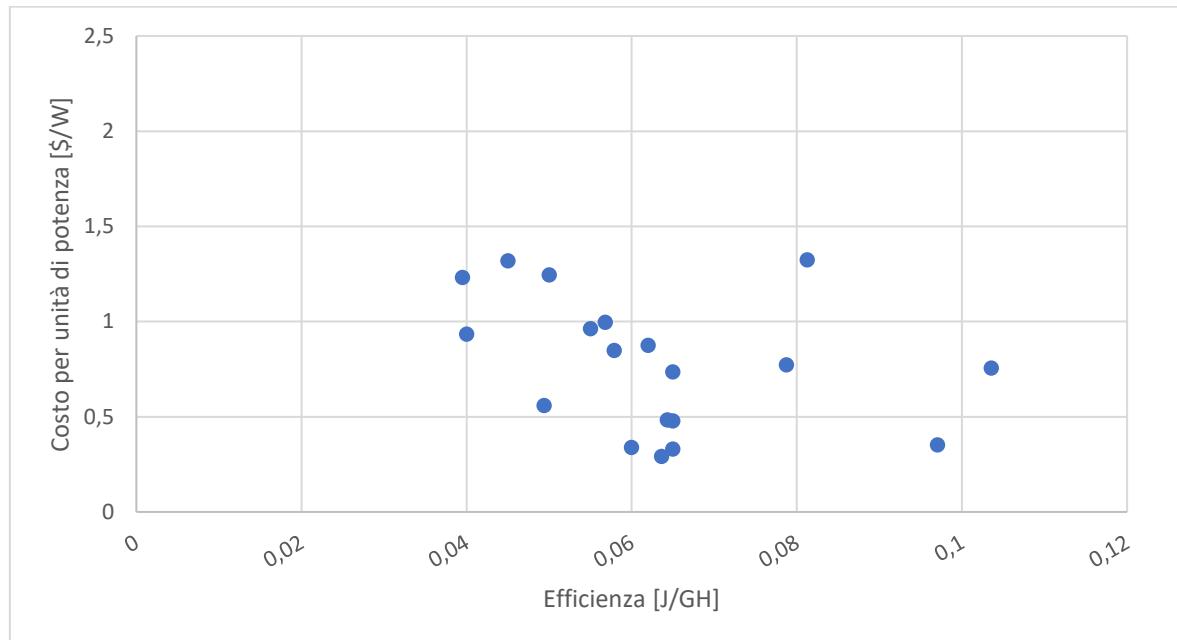


Figura 5.4: Costo per unità di potenza al variare dell'efficienza

Le grandi aziende produttrici vendono principalmente i miner di ultima generazione, ossia con un valore di efficienza più basso. Come si può notare in *Figura 5.4*, i miner con i valori di efficienza più bassi (migliori performance) non superano il prezzo di 1,3 [\$/W]; siccome questo mercato incomincia ad essere abbastanza maturo, fintanto che non si verificano stravolgimenti tecnologici tali da rendere gli Asic obsoleti, è possibile vedere questo

⁸ Capita spesso che gli hardware utilizzati per il mining vengano prodotti nei paesi asiatici e il trasporto avvenga via nave; le spese di spedizione non sono quindi trascurabili e in seguito ad una ricerca di mercato risulta sensato considerare un valore pari al 4% sul totale del valore della merce.

5. Metodologia di analisi proposta

parametro circa costante⁹. Per semplicità, si decide di approssimare il costo per unità di potenza dei miner più performanti pari a 1,3 [\$/W].

Una volta terminato il loro ciclo di vita, i miner dovranno essere venduti per ritornare di parte dell’investimento; i possibili clienti interessati all’acquisto di miner usati sono quelli che possono accedere a costi di corrente elettrica più bassa rispetto ai venditori. Maggiore è il costo di corrente elettrica, minore sarà la vita utile del miner ma maggiore sarà il suo valore sul mercato al momento della vendita. Questa fase, però, non interesserà la simulazione perché esterna alla finestra temporale di studio.

Si vuole ora considerare un’altra caratteristica tecnica del miner che si sta ipotizzando di utilizzare nel Data Center: in *Figura 5.5* si può notare che, analizzando i dati di 78 Asic di Bitcoin (disponibili sul sito asicminervalue.com) la potenza di una singola unità di Asic di Bitcoin rilasciata sul mercato, a prescindere dal suo peso e volume occupato, tende ad assumere un andamento crescente nel tempo. Per definire quindi il valore di potenza di una singola unità di Asic stabilita nella simulazione del Data Center, si utilizzerà il valore di ordinata risultante dall’intersezione tra la retta avente come ascissa la data di rilascio commerciale del miner e la linea di tendenza che meglio interpola i punti sul grafico (linea di tendenza esponenziale con $R^2 = 0,42$).

⁹ Per rendere l’idea, allo stesso modo può essere visto il mercato degli smartphone: periodicamente escono nuovi modelli di smartphone che possiedono alcune caratteristiche tecniche migliori rispetto ai modelli precedenti; essi possiedono però dei prezzi paragonabili a quelli di uscita dei modelli precedenti, i quali, nel frattempo, avranno visto i loro prezzi ridursi. Fintanto che sul mercato della telefonia non subentrerà una tecnologia dirompente che in qualche modo integrerà o sostituirà i servizi forniti dagli smartphone (basti pensare al mercato degli Ipod, gradualmente morto con l’avvento degli Iphone), questa condizione continuerà molto probabilmente a ripetersi.

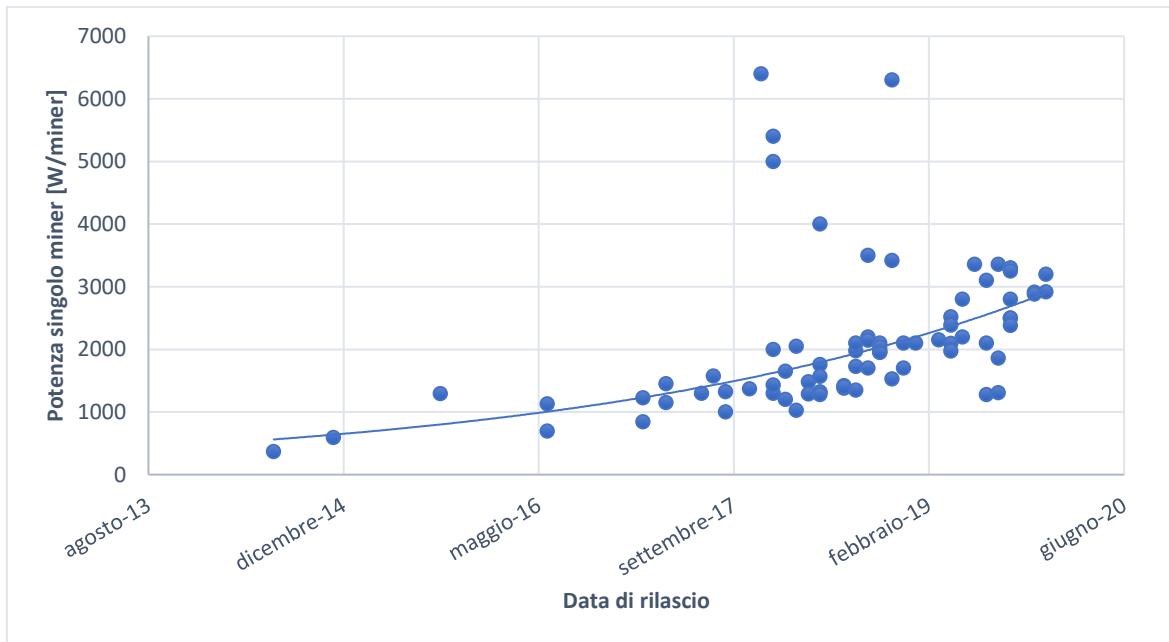


Figura 5.5: Variazione di potenza per singola unità di Asic di Bitcoin nel tempo

A pari potenza installata risulterebbe quindi che per un Data Center costruito in un periodo temporale più lontano verrebbero utilizzati più unità di Asic di potenza specifica più bassa e viceversa nel caso in cui il Data Center venisse costruito in un periodo temporale più vicino; il costo di investimento risulterebbe però essere sempre lo stesso.

5.2.1 Dati di Input

I **dati di input** sono i dati che vengono utilizzati nella simulazione.

È possibile classificare i dati di Input di nostro interesse come appartenenti a 2 macro-categorie: i *dati storici* e i *dati di sistema*.

5. Metodologia di analisi proposta

Dati storici

I **dati storici** sono l’insieme dei valori assunti quotidianamente alle 00:00 (UTC) dai parametri della rete Bitcoin e dai parametri economici utilizzati nella modellazione.

È possibile identificare due tipologie di *dati storici*:

- Dati storici primitivi
- Dati storici derivati

Si definiscono “**Dati storici primitivi**” i dati giornalieri resi disponibili sul sito blockchain.com dei seguenti parametri:

- **Prezzo Bitcoin** $\left[\frac{\$}{BTC} \right]$

Il controvalore espresso in dollari della moneta virtuale Bitcoin.

- **Difficoltà** []

Parametro numerico che indica la difficoltà di ottenere una ricompensa attraverso il processo di mining rispetto ad un valore di riferimento pari a 1. Viene descritto nel capitolo 3.4.4 Difficoltà.

- **Fees totali** $\left[\frac{BTC}{blocco} \right]$

Il totale delle commissioni pagate ai minatori per ogni blocco minato sulla rete Bitcoin per la giornata di riferimento.

- **Numero transazioni** $\left[\frac{tx}{giorno} \right]$

Il numero di transazioni effettuate sulla rete di Bitcoin per la giornata di riferimento.

- **Numero transazioni per blocco** $\left[\frac{tx}{blocco} \right]$

Il numero di transazioni contenute mediamente in un blocco minato per la giornata di riferimento.

- **Conversione Euro/Dollaro** $\left[\frac{\$}{\epsilon} \right]$

Controvalore espresso in dollari [57] di un equivalente quantitativo in euro.

Si definiscono “**Dati storici derivati**” i dati giornalieri ottenuti a partire da una combinazione di dati storici primitivi.

Essi sono:

$$- \quad \text{Numero blocchi minati} \left[\frac{\text{blocchi}}{\text{giorno}} \right] = \frac{\text{Numero transazioni} \left[\frac{\text{tx}}{\text{giorno}} \right]}{\text{Numero transazioni per blocco} \left[\frac{\text{tx}}{\text{blocco}} \right]} \quad (17)$$

Il numero di blocchi minati per la giornata di riferimento.

$$- \quad \text{Fees per blocco} \left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right] = \frac{\text{Fees totali} \left[\frac{\text{BTC}}{\text{giorno}} \right]}{\text{Numero di blocchi minati} \left[\frac{\text{blocchi}}{\text{giorno}} \right]} \quad (18)$$

La media delle commissioni totali pagate ai minatori per le transazioni contenute in un blocco per la giornata di riferimento.

Dati di sistema

Si identificano come “**Dati di sistema**” i parametri tecnico-economici legati al processo di mining che verranno utilizzati nel modello di simulazione.

Essi vengono classificati nelle seguenti categorie:

- Hardware mining
- Dati economici
- Dati di impianto
- Dati di default

5. Metodologia di analisi proposta

I parametri della categoria “**Hardware mining**” sono alcuni dei parametri tecnici dell’ipotetico miner utilizzato; in seguito alle ipotesi fatte, essi saranno funzione della data di rilascio commerciale. In generale, si utilizzerà un Asic adibito al mining di Bitcoin (algoritmo crittografico utilizzato: SHA256) la cui data ufficiale di rilascio dovrà essere precedente a quella di inizio simulazione.

Un esempio di miner ASIC è raffigurato in Figura 5.6; le sue specifiche tecniche sono rappresentate invece in Tabella 5.1.

Bitmain
Antminer S9 (13Th)



Figura 5.6: Esempio di Asic di Bitcoin: Bitmain Antminer S9 (13 Th)

Specifications

Manufacturer	Bitmain
Model	Antminer S9 (13Th)
Release	July 2017
Size	135 x 158 x 350mm
Weight	4200g
Chip boards	3
Chip name	BM1387
Chip size	16nm
Noise level	85db
Fan(s)	2
Power	1300W
Wires	10 * 6pins
Voltage	11.60 ~13.00V
Interface	Ethernet
Temperature	0 - 40 °C
Humidity	5 - 95 %

Tabella 5.1: Specifiche tecniche Bitmain Antminer S9 (13 TH) [58]

Nel modello si utilizzeranno i seguenti parametri tecnici:

- **Efficienza miner** $\left[\frac{J}{GH}\right]$

L' "Efficienza miner" è un parametro che misura le performance di una macchina di mining (vedi 3.4.5 *Efficienza*); è espresso in [J/GH] ossia [Joule/GigaHash] e viene ottenuto dalla *Figura 5.3* come ordinata del punto di intersezione tra la retta di ascissa

5. Metodologia di analisi proposta

costante pari alla data di rilascio del miner utilizzato e le linee di minima efficienza evidenziate sul grafico.

- **Costo per unità di potenza installata** $\left[\frac{\$}{W}\right]$

Il “*Costo per unità di potenza installata*” è il prezzo di acquisto per unità di potenza installata. Lo si stabilisce pari a $1,3 \left[\frac{\$}{W}\right]$.

- **Potenza singolo miner** $\left[\frac{W}{miner}\right]$

La “*Potenza singolo miner*” è il valore di potenza assorbita da ogni singola macchina, espresso in [W], ottenuto dalla Figura 5.5 come ordinata del punto di intersezione tra la linea di tendenza esponenziale e la data di rilascio del miner utilizzato. Esso viene arrotondato in eccesso all’unità più vicina.

La categoria “**Dati economici**” comprende i parametri economici di interesse legati al contesto industriale del mining.

Essi sono:

- **Costo energia elettrica** $\left[\frac{\epsilon}{kW}\right]$

Il “*Costo energia elettrica*” è un parametro estremamente variabile nel contesto europeo (vedi Tabella 5.2); in Italia le aziende pagano molto per il consumo di energia elettrica rispetto agli altri paesi dell’Unione Europea. Esso dipende da diversi fattori, tra cui l’elevato costo di produzione dell’energia nel nostro paese, gli oneri e le imposte.

c€/kWh	FASCIA DI CONSUMO ANNUO (MWh)					
	< 20	20-500	500-2.000	2.000-20.000	20.000-70.000	70.000-150.000
Bulgaria	12.96	10.65	9.03	8.11	7.03	6.66
Danimarca	29.59	27.1	26.45	26.32	24.03	23.85
Finlandia	11.01	10.32	8.33	7.99	6.48	6.33
Francia	17.68	14.44	11.5	9.18	7.45	6.14
Germania	28.08	22.92	19.88	16.93	12.89	13.69
Italia	26.42	20.53	16.94	14.97	12.98	9.43
Lussemburgo	14.51	10.83	8.61	7.08	4.29	n.d.
Regno Unito	17.91	17.16	15	14.25	14.08	13.81
Spagna	28.14	16.67	12.67	10.53	9.42	8.7
Svezia	17.31	9.77	8.09	6.93	5.88	5.01
Area euro	23.66	18.1	14.72	12.59	10.39	9.44

Tabella 5.2: Prezzi finali dell'energia elettrica al lordo delle imposte per i consumatori industriali di diversi paesi europei nel 2017

Fonte: ARERA Elaborazione su dati Eurostat Relazione annuale 2018

Un Data Center di 1 [MW] di potenza installata, funzionante 24 ore al giorno per tutto l'anno, consumerebbe idealmente: $1 \text{ [MW]} \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot 365 \left[\frac{\text{giorni}}{\text{anno}} \right] = 8760 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{anno}} \right]$. Dai valori di Tabella 5.2 risulterebbe quindi un costo di corrente elettrica medio di $0.15 \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$.

- **Mining pool fee [%]**

La “Mining Pool fee” è la commissione che bisogna pagare alla mining pool di appartenenza per il servizio fornito (*vedi 3.4.2 Mining Pool*). Si sceglie una mining pool che utilizza come metodo di pagamento lo “score”, tale da rendere il calcolo dei premi più stabile ed equo nel tempo. Un valore diffusamente utilizzato come commissione per questa tipologia di mining pool è il 2% sul totale dei ricavi.

- **Conversione BTC/\$ fee [%]**

5. Metodologia di analisi proposta

La “*Conversione BTC/\$ fee*” è la commissione che un exchange (piattaforma di trading) richiede per l’operazione di cambio valuta: da BTC a \$ oppure viceversa. Essa può essere ritenuta presumibilmente pari a 0.25 % del valore totale della transazione. [59]

- **Costo O&M pro capite annuo** $\left[\frac{\$}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \right]$

Il “*Costo O&M pro capite annuo*” è il costo annuo per un tecnico di “Operation and Maintenance” (gestione e manutenzione) assunto con un contratto full time. Lo si ipotizza essere pari a 30,000 $\left[\frac{\$}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \right]$.

Della categoria “**Dati impianto**” appartengono i parametri tecnici di interesse legati al Data Center di mining nel suo complesso.

Essi sono:

- **Potenza da installare [kW]**

La “*Potenza da installare*” è il valore di potenza che si progetta di installare; esso sarà pari a 1000 [kW] = 1 [MW], valore minimo che consente ad un’UVAC di fornire il servizio di flessibilità.

- **N. di tecnici per unità di potenza installata** $\left[\frac{\text{persone}}{\text{MW}} \right]$

In seguito ad alcune ricerche, risulta plausibile ipotizzare che in una mining farm lavorino full time 2 persone per ogni MW. Dalla IPO di Bitmain [60] risulta infatti che il 30 giugno 2018 siano presenti 535 dipendenti nell’area “Maintenance and management of mining farms”, operanti in 11 mining farms comprendenti oltre 300 [MW] di potenza installata.

- **PUE []**

Il “PUE” o *Power Usage Effectiveness* è un parametro utilizzato per misurare l’efficienza energetica dei Data Center [61] ed esprimibile come:

$$PUE = \frac{\text{Consumo energetico totale Data center}}{\text{Consumo apparecchiature IT}} \quad (19)$$

Per “Consumo apparecchiature IT” si intende, nel caso di mining farm, il consumo degli hardware di mining, dei server e dei sistemi di accumulo (se presenti); per “Consumo energetico totale Data Center” si intende il consumo comprendente, oltre a quello delle apparecchiature IT (*Information Technology*), anche quello dei sistemi di raffreddamento, degli impianti di illuminazione e delle infrastrutture di supporto.

Come si può vedere in Tabella 5.3, un valore tipico di PUE per un Data Center è pari a 2, ossia che per ogni Watt di potenza consumata dagli apparecchi IT, due Watt di potenza sono consumati dal Data Center nel suo complesso; per i Data Center più grandi [62], questo valore può scendere anche ad una media di 1,67. Le macchine utilizzate, infatti, si trovano a funzionare 24 ore al giorno per tutto l’anno e, essendo molto sensibili alla temperatura, possono guastarsi a causa del surriscaldamento; pertanto, i sistemi di raffreddamento e ventilazione, giocano un ruolo fondamentale nel garantire l’affidabilità e la sicurezza delle apparecchiature.

PUE	Category
3.0	Very inefficient
2.5	Inefficient
2.0	Average
1.5	Efficient
1.2	Very Efficient

Tabella 5.3: Livello di efficienza dei Data Center [63]

Per un Data Center di mining, essendo il costo dell’elettricità la voce principale di costo, ci sarebbe un chiaro incentivo nel voler ottimizzare i sistemi di raffreddamento

5. Metodologia di analisi proposta

al fine di ridurre i costi complessivi. È molto probabile, quindi, che il PUE dei Data Center di mining sia significativamente inferiore rispetto al valore riscontrato nei Data Center tradizionali; è ragionevole assumere [56] per una mining farm ex novo un valore di PUE pari a 1,2. Basti pensare che Google negli ultimi anni ha aumentato l'efficienza dei suoi Data Center [64], fino a raggiungere una media di PUE pari a 1,11. È possibile raggiungere tali valori grazie all'utilizzo di diverse nuove tecnologie, quale ad esempio la tecnologia “*ad immersione*”, [65] nella quale i server vengono immersi in un refrigerante o liquido dielettrico termicamente conduttivo; il fluido in questione deve possedere ottime proprietà di isolamento (elettrico) al fine di garantire il contatto in sicurezza con le componenti elettroniche in tensione. Il calore viene poi rimosso facendo passare questo fluido attraverso uno scambiatore di calore.

Un PUE uguale a 1 rappresenta l'efficienza ottimale per un Data Center: tutta l'energia consumata dal Data Center è consumata solo dagli apparecchi IT.

I “*Dati di default*” sono parametri tecnici definiti da protocolli specifici.

- **Tempo medio chiusura blocco** $\left[\frac{h}{blocco} \right]$

Il “*Tempo medio chiusura blocco*” è il tempo medio che un blocco impiega mediamente per essere validato da un nodo di mining. Da protocollo si ha che un blocco deve essere minato ogni 10 minuti, ossia ogni ora dovrebbero essere minati 6 blocchi; calcolando l'inverso si ottiene il numero di ore (o frazione di ora) nel quale un blocco viene minato.

5.2.2 Calcoli analitici

Si è deciso di installare 1 [MW] di potenza per il Data Center di mining oggetto dello studio:

$$\textbf{Potenza da installare} [kW] = 1000$$

Si vogliono quindi definire alcune delle caratteristiche tecnico-economiche del miner virtuale utilizzato nella simulazione del Data Center; una volta definita la data di rilascio commerciale del miner, si potranno determinare graficamente tre parametri, dei quali i primi ottenuti come valore di ordinata del punto di intersezione tra la data di rilascio e la linea di tendenza esponenziale tracciata nei relativi grafici:

$$\textbf{Potenza singolo miner} \left[\frac{W}{\text{miner}} \right] = \text{(vedi Figura 5.5)}$$

$$\textbf{Efficienza miner} \left[\frac{J}{GH} \right] = \text{(vedi Figura 5.3)}$$

$$\textbf{Costo per unità di potenza installata} \left[\frac{\$}{W} \right] = 1,3 \text{ (vedi Figura 5.4)}$$

Conoscendo la potenza richiesta da una singola unità di miner, il suo valore di efficienza e il suo costo, si può calcolare i seguenti parametri:

$$\begin{aligned} \textbf{Hash rate singolo miner} \left[\frac{TH}{s \cdot \text{miner}} \right] &= & (20) \\ &= \frac{\text{Potenza singola miner} \left[\frac{W}{\text{miner}} \right]}{\text{Efficienza miner} \left[\frac{J}{GH} \right] \cdot 1000 \left[\frac{GH}{TH} \right]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textbf{Costo singolo miner} \left[\frac{\$}{\text{miner}} \right] &= & (21) \\ &= \text{Costo per unità} \left[\frac{\$}{W} \right] \cdot \text{Potenza singolo miner} \left[\frac{W}{\text{miner}} \right] \end{aligned}$$

$$N. \text{di miner} [\text{miner}] = \left[\frac{\text{Potenza da installare} [kW]}{\text{Potenza singolo miner} \left[\frac{W}{\text{miner}} \right]} \cdot 1000 \left[\frac{W}{kW} \right] \right] \quad (22)$$

5. Metodologia di analisi proposta

Da quest'ultimo parametro si Andrà a calcolare l'effettivo valore di potenza installata e il massimo valore di Hash rate che l'impianto fornirà a regime:

$$\textbf{Potenza effettiva installata} [kW] = \quad (23)$$

$$= \frac{N. di miner [miner] \cdot \text{Potenza singolo miner} \left[\frac{W}{miner} \right]}{1000 \left[\frac{W}{kW} \right]}$$

$$\textbf{Hash Rate impianto MAX} \left[\frac{TH}{s} \right] = \quad (24)$$

$$= N. di miners [miner] \cdot \text{Hash rate singolo miner} \left[\frac{TH}{s \cdot miner} \right]$$

Conoscendo i parametri precedentemente calcolati e il valore medio di Hash rate assunto dalla rete Bitcoin nel periodo in cui la “Difficoltà” assume un valore costante, riportato nell’equazione (15), è possibile determinare i seguenti parametri economici:

1. I ricavi operativi quotidiani associati all’attività di mining in senso stretto:

$$\textbf{Ricavi} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \frac{\text{Hash Rate impianto MAX} \left[\frac{TH}{s} \right]}{\text{Hash Rate rete Bitcoin} \Big|_{Difficoltà} \left[\frac{TH}{s} \right]} \cdot \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \cdot \text{Numero blocchi minati} \left[\frac{blocchi}{giorno} \right] \cdot \text{Premio per blocco} \left[\frac{\$}{blocco} \right] \cdot \\ & \cdot \left(1 - \frac{\text{Mining pool fee [%]}}{100} \right) \cdot \left(1 - \frac{\text{Conversione} \frac{BTC}{\$} \text{fee [%]}}{100} \right) \cdot \\ & \cdot \frac{1}{\text{conversione} \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} [\frac{\$}{\epsilon}]} \end{aligned}$$

Dove il parametro “*Premio per blocco*” viene definito come:

$$\begin{aligned}
 \textbf{Premio per blocco} \left[\frac{\$}{blocco} \right] &= \\
 &= \left(\begin{array}{l} \text{Premio Coinbase } \left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right] \\ + \text{Fees per blocco } \left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right] \end{array} \right) \cdot \text{Prezzo Bitcoin } \left[\frac{\$}{\text{BTC}} \right]
 \end{aligned} \tag{26}$$

Quest’ultimo parametro è il corrispettivo economico ottenuto dal lavoro di mining e comprende i bitcoin coniati con la chiusura del blocco (*Premio Coinbase*) e le commissioni relative alle transazioni appartenenti al blocco stesso (*Fees per blocco*).

Il “*Premio Coinbase*” è il premio in Bitcoin che viene assegnato a colui che per primo “mina” il blocco, ossia colui che per primo, grazie alla potenza computazionale dei suoi miner, trova il *Nonce* che porta al raggiungimento della *soglia Target* (vedi la parte introduttiva del paragrafo 3.4 Mining). È iniziato valendo 50 $\left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right]$ e mediamente subisce un dimezzamento ogni 4 anni circa; attualmente si sono verificati due dimezzamenti: il 28 novembre 2012 (da 50 $\left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right]$ a 25 $\left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right]$) e il 9 luglio 2016 (da 25 $\left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right]$ a 12,5 $\left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right]$). Il prossimo dimezzamento o “halving” è atteso per maggio 2020 (da 12,5 $\left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right]$ a 6,25 $\left[\frac{\text{BTC}}{\text{blocco}} \right]$).

2. I costi operativi quotidiani associati all’attività di mining in senso stretto:

$$\begin{aligned}
 \textbf{Costi} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] &= \text{Potenza effettiva installata } [kW] \cdot \\
 &\cdot \text{Costo energia elettrica } \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{giorno} \right] \cdot \text{PUE } []
 \end{aligned} \tag{27}$$

Essi comprendono essenzialmente i costi dell’energia elettrica consumata dai miner.

Combinando i “*Costi*” e i “*Ricavi*” si può calcolare il “*Profitto*” (o perdita) giornaliero:

5. Metodologia di analisi proposta

$$\text{Profitto} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = \text{Ricavi} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] - \text{Costi} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] \quad (28)$$

Si può calcolare un ulteriore parametro economico (espresso in euro): il “*Flusso netto di cassa*” o FNC:

$$\begin{aligned} & \text{Flusso netto di cassa [€]} = \\ & = - \sum_{n=1}^N \frac{\text{Investimento DC [\$]}}{\text{Conversione } \frac{\text{euro}}{\text{dollaro}} (n=1) \left[\frac{\$}{\text{€}} \right]} + \\ & + \text{Profitto}(n) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] - \sum_{f=1}^M \text{Costo O&M mensile }(f) \left[\frac{\text{€}}{\text{mese}} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

dove:

- n = giorno; f = ultimo giorno del mese; N = giorni di contratto; M = mesi di contratto
- “*Investimento DC*” è l’investimento del Data Center, inteso come costo delle apparecchiature IT e viene calcolato come:

$$\begin{aligned} & \text{Investimento DC [\$]} = \\ & = N. \text{di miner} [\text{miner}] \cdot \text{Costo singolo miner} \left[\frac{\$}{\text{miner}} \right] \end{aligned} \quad (30)$$

oppure:

$$\begin{aligned} \text{Investimento DC [\$]} & = \frac{\text{Costo per unità}}{\text{di potenza installata}} \left[\frac{\$}{W} \right] \cdot \\ & \cdot \frac{\text{Potenza}}{\text{effettiva installata}} [kW] \cdot 1000 \left[\frac{W}{kW} \right] \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
 - & \text{Costo O&M mensile } \left[\frac{\text{€}}{\text{mese}} \right] = \\
 & = \frac{\text{Costo O&M pro capite annuo} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \right]}{12 \left[\frac{\text{mesi}}{\text{anno}} \right]} \cdot \text{Numero di tecnici [persone]} \quad (32)
 \end{aligned}$$

I costi annui di gestione e manutenzione vengono allocati mensilmente nel calcolo del flusso netto di cassa, per l'esattezza nell'ultimo giorno di ogni mese.

$$\begin{aligned}
 - & \text{Numero di tecnici [persone]} = \\
 & = \frac{N. \text{ di tecnici per unità di potenza installata} \left[\frac{\text{persona}}{\text{MW}} \right] \cdot \text{Potenza effettiva installata} [\text{kW}] \cdot}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} \quad (33)
 \end{aligned}$$

Il numero di tecnici impiegati stabilmente in azienda per la gestione dei miner. Il risultato della (33) viene arrotondato al numero intero più vicino.

Il *Flusso netto di cassa* tiene conto oltre ai costi e ai ricavi operazionali del processo di mining in senso stretto, anche dei costi di manodopera di gestione e manutenzione della mining farm.

5.3 Scenari di studio

Si è visto precedentemente che per un mercato finanziario si ha la ripetizione con una certa frequenza di un particolare schema o *pattern*, comprendente tre fasi principali. Le figure Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 di pagina 94 evidenziano come questo particolare schema si sia venuto a creare tre volte nel corso della vita finanziaria di bitcoin. In questo paragrafo si vogliono identificare i momenti critici all'interno di questo pattern che definiranno gli inizi temporali delle finestre di studio; così facendo si ritiene che si otterranno risultati

5. Metodologia di analisi proposta

economici più coerenti e significativi quando verranno confrontati i vari pattern. Sarebbe troppo ottimistico aspettarsi valori simili nel confronto tra due determinate finestre temporali sviluppatesi nell'intorno di uno stesso punto critico di due pattern diversi, ma ci si attende almeno dei valori che abbiano la stessa unità di grandezza in termine di NCF; in tal modo si potrebbe ritenere indifferente la scelta del pattern storico sul quale basare la simulazione.

La finestra temporale usata per la simulazione sarà la durata del contratto di fornitura del servizio di flessibilità stipulato con TERNA, ipotizzata pari a 6 mesi per una tipologia di simulazione e 1 anno per l'altra.

Guardando attentamente i grafici di Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3, si evidenziano tre punti critici dai quali risulta interessante far partire una simulazione:

- Il punto di **Up** (appartenente alla *fase accumulativa*), ossia il punto in cui il grafico assume il valore massimo all'interno del trend rialzista;
- Il punto di **Bottom** (appartenente alla *fase distributiva*), ossia il punto in cui il grafico assume il valore minimo all'interno del trend ribassista; nel grafico viene raggiunto nella zona evidenziata come “Lower lows”;
- Il punto di **Breakout**, ossia il punto in cui si ha la rottura di un determinato livello (di supporto o resistenza) con elevati volumi¹⁰, che da generalmente il via ad un movimento fortemente direzionale (ribassista o rialzista) [66]. Nel nostro caso si considera un Breakout che dà origine a un *trend rialzista* all'interno del pattern in questione.

Per ognuno dei tre scenari i tre punti critici saranno individuati dalle seguenti date temporali:

Scenario 1

- Periodo critici:
- UP: 10 giugno 2011
 - BOTTOM: 19 novembre 2011
 - BREAKOUT: 13 luglio 2012

¹⁰ Numero di contratti di un asset che viene scambiato in un determinato periodo di tempo [79]

Non esistendo ancora gli Asic nel periodo in cui si è venuto a creare il primo schema ciclico del prezzo di bitcoin, si è ritenuto che non sarebbe stato un metro di confronto coerente l'utilizzazione dei dati storici di questo scenario. Per esso non si eseguirà quindi alcuna simulazione.

Scenario 2

Periodo critici:

- UP: 29 novembre 2013
- BOTTOM: 14 gennaio 2015
- BREAKOUT: 29 ottobre 2015

Scenario 3

Periodo critici:

- UP: 16 dicembre 2017
- BOTTOM: 15 dicembre 2018
- BREAKOUT: 2 aprile 2019

5.4 Modello di simulazione risultati MSD

Il Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD) è un mercato pay-as-bid su base nodale, cioè che la selezione delle offerte non considera solo l'ordine di merito economico ma anche le reali necessità ed esigenze della rete; queste ultime, infatti, possono rendere un servizio offerto da una risorsa più utile rispetto a quello, magari più economico, di un'altra risorsa. L'elaborazione delle relative offerte deve tenere in conto di molteplici fattori: rispetto al MGP, la percentuale di accettazione rispetto al totale delle offerte presentate è minore e legata alla posizione geografica e alla tipologia di criticità necessaria da risolvere. [67]

Si vuole creare un modello che possa riproporre, attraverso la raccolta di dati di mercato, la migliore significatività dal punto di vista statistico; a tale scopo, si farà ricorso alla teoria

5. Metodologia di analisi proposta

della probabilità. Una delle principali funzioni di probabilità continua è la ***distribuzione normale*** o ***Gaussiana***; essa è caratterizzata dalla seguente funzione di densità di probabilità, cui spesso si fa riferimento con la dizione *curva di Gauss* o *gaussiana* [68]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \text{ con } x \in \mathbb{R} \quad (34)$$

dove μ è il valore atteso e σ^2 la varianza.

Il grafico della *funzione di densità di probabilità* è simmetrico e ha una forma a campana, nota come *campana di Gauss* (vedi *Figura 5.7*). Standardizzando (statisticamente) la variabile casuale si ottiene la funzione di ripartizione, il cui grafico è riportato sempre in *Figura 5.7* e la cui espressione risulta essere:

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{(x - \mu)}{\sigma\sqrt{2}} \right) \quad (35)$$

dove erf è la funzione degli errori (*error function*), μ è la media e σ la deviazione standard (o scarto quadrtico medio) [69].

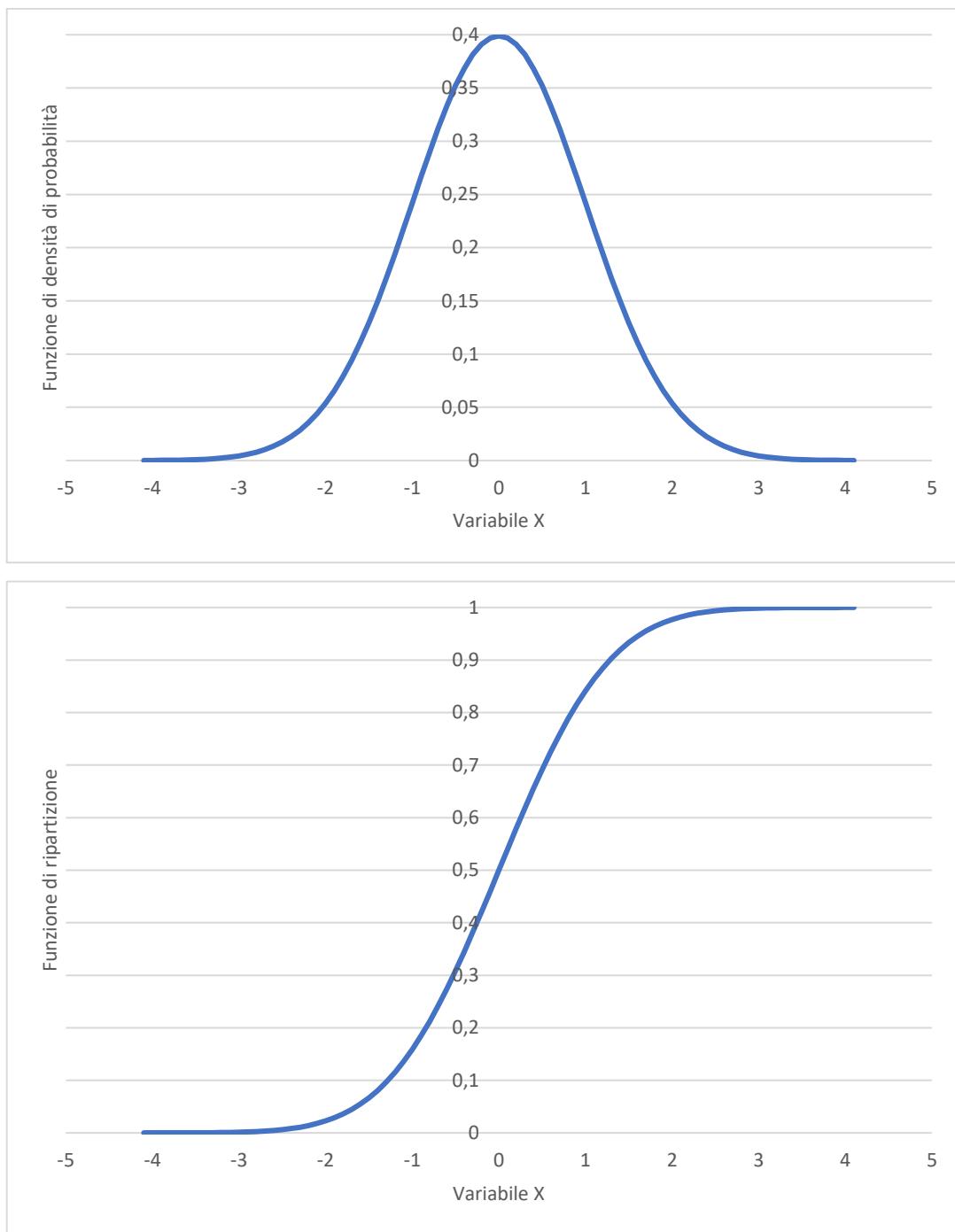


Figura 5.7: Funzione di densità di probabilità (sopra) e funzione di ripartizione (sotto)

La Figura 5.7 fa riferimento alla variabile casuale normale *standardizzata*, dove le variabili μ e σ^2 assumono rispettivamente i valori 0 e 1.

5. Metodologia di analisi proposta

Dal sito del GME (*Gestori Mercati Energetici*) è possibile accedere a numerosi parametri relativi agli esiti dei mercati elettrici; di nostro interesse saranno gli esiti del *Mercato dei Servizi di Dispacciamento* (MSD), nella sottofase MSD6 della fase **ex-ante** della **zona Nord** del mercato elettrico italiano. Non essendo però disponibili parametri quali la quantità, il prezzo e il numero delle singole offerte orarie zonali, non è stato possibile ricostruire una distribuzione di probabilità approssimante nel miglior modo possibile la realtà (dal punto di vista statistico). Si procederà quindi con un *modello* alternativo, frutto di alcune ipotesi.

Nei calcoli verranno utilizzati i seguenti parametri (sempre disponibili tramite il GME):

- **Prezzo marginale a salire zonale orario** (prezzo massimo di vendita) $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$
- **Prezzo medio ponderato a salire zonale orario** $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$
- **Offerte accettate a salire zonale orario*** [numero]

* relative alla globalità delle zone di mercato perché non erano disponibili i dati per le singole zone; essendo però la zona Nord quella in cui si ha la maggior parte delle offerte, non si avranno effetti significativi sulla qualità dei risultati.

Verranno considerati i valori storici di questi parametri, assunti nei periodi temporali delle varie simulazioni; prendendo i dati relativi al 1° settembre 2017, ad esempio, essi assumeranno un andamento orario riportato nel grafico combinato di *Figura 5.8*.

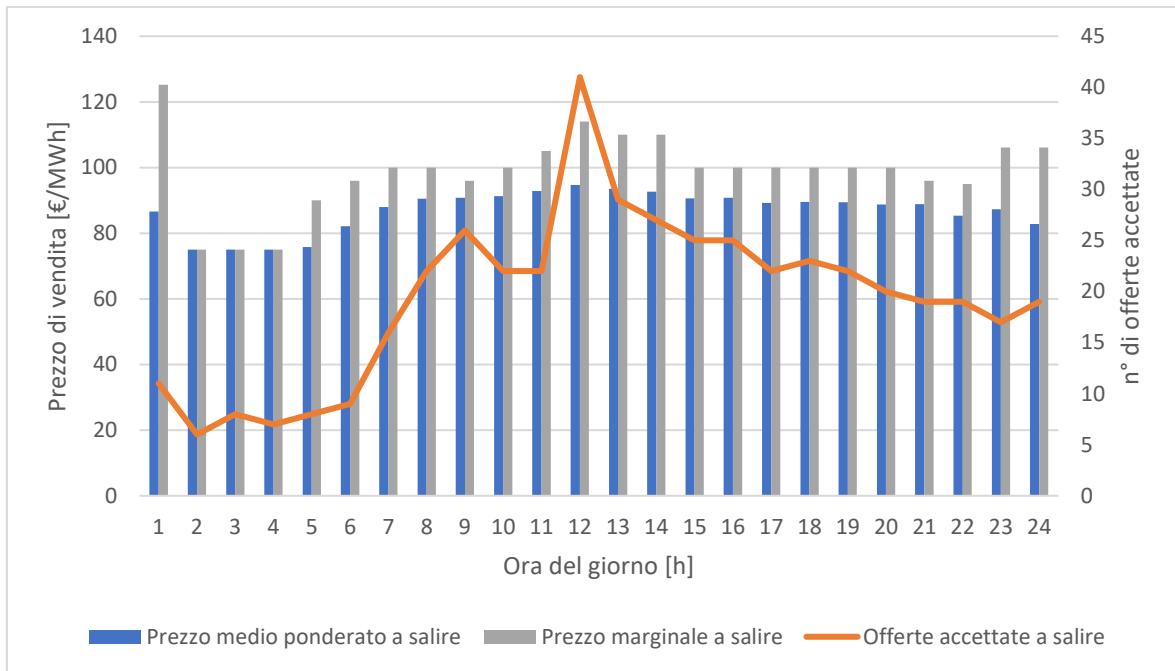


Figura 5.8: Prezzo medio ponderato a salire zona Nord, prezzo marginale a salire zona Nord e numero di offerte accettate nazionali del 1° settembre 2017 [3]

Attraverso i *prezzi medi ponderati orari* si andranno a calcolare i *prezzi medi ponderati giornalieri*, che risulteranno:

$$\text{Prezzo medio ponderato a salire zonale giornaliero} = \overline{P_p} = \quad (36)$$

$$= \frac{\sum_{m=1}^{24} \left(\text{Prezzo medio ponderato a salire zonale orario}_m \cdot \text{Offerte accettate a salire zonale orario}_m \right)}{\sum_{m=1}^{24} \left(\text{Offerte accettate a salire zonale orario}_m \right)}$$

dove m è l'ora del giorno.

Si introducono i parametri fintizi “*Prezzo medio ponderato marginale a salire zonale giornaliero*” e “*Prezzo medio ponderato minimo a salire zonale giornaliero*”, ottenibili dalle seguenti equazioni:

5. Metodologia di analisi proposta

$$\begin{aligned}
 & \text{Prezzo medio ponderato marginale} = \overline{P_{p,M}} = \\
 & \text{a salire zonale giornaliero} \\
 & = \frac{\sum_{m=1}^{24} \left(\frac{\text{Prezzo marginale}}{\text{a salire zonale orario}_m} \cdot \frac{\text{Offerte accettate}}{\text{a salire zonale orario}_m} \right)}{\sum_{m=1}^{24} \left(\frac{\text{Offerte accettate}}{\text{a salire zonale orario}_m} \right)} \tag{37}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Prezzo medio ponderato minimo} = \overline{P_{p,m}} = \\
 & \text{a salire zonale giornaliero} \\
 & = \bar{P}_p - (\overline{P_{p,M}} - \bar{P}_p) \tag{38}
 \end{aligned}$$

Per un determinato intervallo di prezzo si valuterà la probabilità di accettazione dell'offerta attraverso la funzione di **distribuzione normale standard**. Si faranno le seguenti *ipotesi*:

- La *funzione di ripartizione* o di distribuzione cumulativa utilizza il seguente intervallo di variabili indipendenti: $[-3.2, 3.2]$, dai quali si ottengono come risultati valori compresi nell'intervallo $[0.000687, 0.999313]$;
- L'intervallo di variabili indipendenti è legato proporzionalmente al seguente intervallo di prezzo: $[\overline{P_{p,m}}, \overline{P_{p,M}}]$.

Risulterà quindi che il valore \bar{P}_p , all'interno dell'insieme delle variabili indipendenti utilizzabili, verrà associato al valore 0. Inoltre, tutte le offerte superiori a $\overline{P_{p,M}}$ si riterranno rifiutate, mentre quelle inferiori a $\overline{P_{p,m}}$ si riterranno accettate.

Alternativamente al *Prezzo medio ponderato marginale a salire zonale giornaliero* poteva essere utilizzato il più elevato tra i 24 valori di *Prezzi marginali a salire zonali orari* presenti lungo la giornata, ossia l'effettivo valore massimo di offerta fatta durante la giornata. Mantenendo lo stesso iter procedurale, però, il $\overline{P_{p,m}}$ avrebbe assunto frequentemente il valore di 0 (impostato come valore minimo), ossia, che solo tramite un'offerta pari a $0 \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$ sarebbe stata certa l'accettazione; in questo modo, però, la ricostruzione statistica sarebbe risultata poco realistica e non è quindi stata presa in considerazione.

Alla fine, la probabilità di accettazione dell'offerta sarà pari al complemento a 1 del risultato della funzione di ripartizione; essa è stata rappresentata graficamente in *Figura 5.9* per la giornata del 1° settembre.

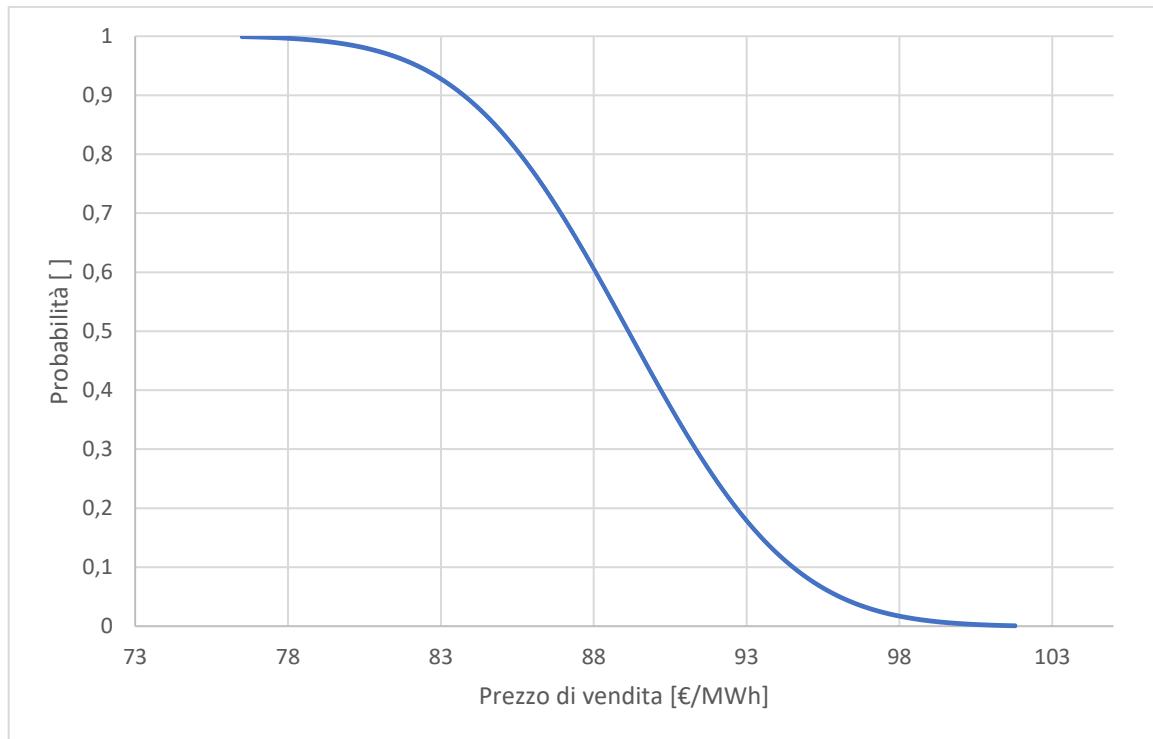


Figura 5.9: Probabilità di accettazione

5.5 UPS

Gli UPS, come descritto nel paragrafo 4.2 *Data Center di mining*, hanno lo scopo di mantenere la forma d’onda di alimentazione delle apparecchiature esente da disturbo e di sopperire, solo inizialmente e per il tempo necessario all’avvio dei gruppi elettrogeni, alla mancanza della rete esterna; essi, inoltre, sono dotati di una minima autonomia (anche fino ad 1 ora) che li rende idonei a sostituire i gruppi elettrogeni per un’eventuale mancata partenza.

Il loro dimensionamento richiede che forniscano il 100% del prelievo di picco delle apparecchiature IT e dei carichi ausiliari (sistemi di climatizzazione e illuminazione); non potranno essere ignorati questi ultimi perché il sistema di condizionamento è fondamentale per evitare guasti alle apparecchiature IT. L’energia richiesta dalle apparecchiature IT del Data Center verrà moltiplicata per il parametro PUE, fattore che tiene conto dei consumi legati al condizionamento e all’illuminazione.

5. Metodologia di analisi proposta

Alcune delle caratteristiche tecniche principali quando si dimensiona un accumulatore sono:

- Cicli di vita
- Rendimento energetico del sistema in carica
- Rendimento energetico del sistema in scarica
- Costo di installazione
- Self-discharge (autoscarica)

In

Tabella 5.4 viene riportato il numero dei cicli vita di una batteria agli ioni di Litio (nello specifico LiPO₄) a vari livelli di DOD (*Depth of Discharge*): il 100% di DOD consiste in un ciclo di carica/scarica completo.

Il parametro *Cicli di vita* indica il numero di cicli da effettuare per portare la capacità della batteria al 70%; ad ogni ciclo si assiste difatti ad una *perdita di carico permanente* dell'accumulatore (noto come fenomeno di *aging*). Si indicherà questa perdita come $P_{ciclo} \left[\frac{\%}{ciclo} \right]$.

Depth of discharge	Discharge cycles
100% DoD	~600
80% DoD	~900
60% DoD	~1,500
40% DoD	~3,000
20% DoD	~9,000
10% DoD	~15,000

Tabella 5.4: Stima del numero di cicli di carica/scarica per una batteria agli ioni di Litio a vari DOD [70]

Il P_{ciclo} viene calcolato attraverso l'equazione:

$$P_{ciclo} = \frac{(100\% - 70\%)}{N_c} \quad (39)$$

dove: N_c è il numero di cicli di vita

Il valore di 70% presente nel numeratore della (39) indica la soglia minima di capacità di carica dell'accumulatore al di sotto della quale si ritengono conclusi i cicli di vita. Ad esempio, la P_{ciclo} per un accumulatore che viene scaricato sempre del 100% della sua capacità, ossia che possiede un parametro DOD pari a 100% (vedi

Tabella 5.4), è pari a:

$$P_{ciclo} = \frac{(100\% - 70\%)}{600} = 0,05 \left[\frac{\%}{ciclo} \right] \quad (40)$$

Le batterie, però, continuano a perdere capacità di carica anche quando non sono in funzione: questo fenomeno prende il nome di *self-discharge* (autoconsumo); esso dipende dalla temperatura a cui si trova la batteria e la % di carica a cui viene lasciata (SOC o State Of Charge). In *Tabella 5.5* sono riportati i valori di perdita di capacità dovuti a questo fenomeno, per una batteria agli ioni di Litio per diversi valori di temperatura e SOC. Nel proseguo si assocerà questa perdita al parametro $P_{s-d} \left[\frac{\%}{anno} \right]$; il suo valore viene tipicamente indicato come perdita % di capacità di carica in un anno di tempo.

Temperatura di deposito	40% di carica	100% di carica
0 °C (32 °F)	2% di perdita dopo 1 anno	6% di perdita dopo 1 anno
25 °C (77 °F)	4% di perdita dopo 1 anno	20% di perdita dopo 1 anno
40 °C (104 °F)	15% di perdita dopo 1 anno	35% di perdita dopo 1 anno
60 °C (140 °F)	25% di perdita dopo 1 anno	40% di perdita dopo 3 mesi

Tabella 5.5: Perdita di capacità di carica al variare della carica e della temperatura [71]

Ad esempio, si può notare che una batteria agli ioni di Litio depositata al 100% di carica durerà molto meno di una depositata al 40%, particolarmente alle alte temperature.

5. Metodologia di analisi proposta

UPS nei Data Center

Per un Data Center è possibile assumere che l'utenza, grazie alla elevata continuità di alimentazione della rete MT a cui è collegata, subisca poche interruzioni senza preavviso all'anno, per una durata complessiva inferiore ad un'ora; essendo il Data Center di mining un sistema passivo che non richiede la memorizzazione di dati sensibili, non risulterebbe conveniente installarci in parallelo un UPS al fine di evitare questi brevi periodi di interruzione di corrente: i maggiori ricavi non colmerebbero i costi di investimento. Qualora però il DC fornisse un servizio di regolazione alla rete elettrica attraverso una sua riduzione periodica e lunga di carico, risulterebbe interessante valutare l'installazione di un UPS accoppiato ad un Gruppo Elettrogeno; l'UPS svolgerebbe una duplice funzione: evitare l'interruzione di corrente qualora si verificasse un guasto alla linea elettrica e intervenire nella fase iniziale del servizio di regolazione, durante l'avviamento del Gruppo Elettrogeno. L'UPS potrebbe quindi essere dimensionato per fornire energia per un tempo arbitrario di 15 minuti ($t_{reg} = 0,25 [h]$), mentre il GE per il tempo rimanente la fornitura del servizio di regolazione; alternativamente potrebbe anche essere dimensionato un UPS come vero e proprio sistema di accumulo, tale da fornire l'alimentazione al Data Center per l'intera durata del servizio.

Un Data Center con una potenza installata pari a \dot{Q}_{DC} richiede all'accumulatore, in caso di mancanza di fornitura di corrente dalla rete elettrica, un'energia pari a:

$$Q_{DC} [kWh] = \dot{Q}_{DC} [kW] * PUE * t_{reg} [h] \quad (41)$$

dove t_{reg} è il numero di ore (o frazione di ore) continuative per cui l'UPS viene chiamato ad intervenire

Si ipotizza che l'accumulatore venga dimensionato per ricevere mediamente alla fine di ogni anno un incremento di capacità pari a quella persa a causa delle irreversibilità; inizialmente dovrà quindi essere progettato per fornire la seguente energia:

$$Q_{UPS,MAX} [kWh] = \frac{Q_{DC} [kWh]}{\eta_s [\cdot] \cdot \left(1 - P_{ciclo} \left[\frac{\%}{anno}\right]\right)} \quad (42)$$

dove η_s è il rendimento di scarica

$P_{ciclo} \left[\frac{\%}{anno}\right]$ viene calcolato a partire da $P_{ciclo} \left[\frac{\%}{ciclo}\right]$ (vedi pagine successive)

La capacità di carica di un accumulatore perde costantemente e irreversibilmente nel tempo della carica; ipotizzando un aggiornamento quotidiano alle 23.59 del parametro considerato, indicato dalla scritta $Q_{UPS}(t)$, esso assumerà nel tempo il valore fornito dalla seguente equazione:

$$Q_{UPS}(t) \left[\frac{kWh}{t}\right] = Q_{UPS,MAX} [kWh] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{t}\right]}{100} + \Delta Q_{UPS}(t = n) \left[\frac{kWh}{t}\right] \quad (43)$$

dove P_{UPS} è la perdita di capacità di carica dell'accumulatore, scelta tra P_{s-d} e P_{ciclo} : nel caso in cui il Data Center al tempo t fornisca un servizio di regolazione, P_{UPS} coinciderà con P_{ciclo} ; contrariamente coinciderà con P_{s-d} .

Ossia che la capacità di carica di un accumulatore al tempo t di riferimento è pari al suo valore massimo iniziale meno le perdite di capacità che si sono verificate tra il tempo $t = 0$ e il tempo t , più un determinato valore di capacità ΔQ_{UPS} aggiunto periodicamente al tempo $t = n$, dove n è l'istante temporale in cui si verifica la condizione critica:

$$Q_{UPS}(t = n) = Q_{UPS,min} \quad (44)$$

dove $Q_{UPS,min}$ è il valore minimo di capacità di carica raggiungibile da dimensionamento.

5. Metodologia di analisi proposta

ΔQ_{UPS} e $Q_{UPS,min}$ si calcolano rispettivamente dalle seguenti equazioni:

$$\Delta Q_{UPS} = Q_{UPS,MAX} - Q_{UPS,min} \quad (45)$$

$$Q_{UPS,min} = \frac{Q_{DC}}{\eta_s} \quad (46)$$

L'andamento nel tempo del parametro ΔQ_{UPS} è riportato in Figura 5.10.

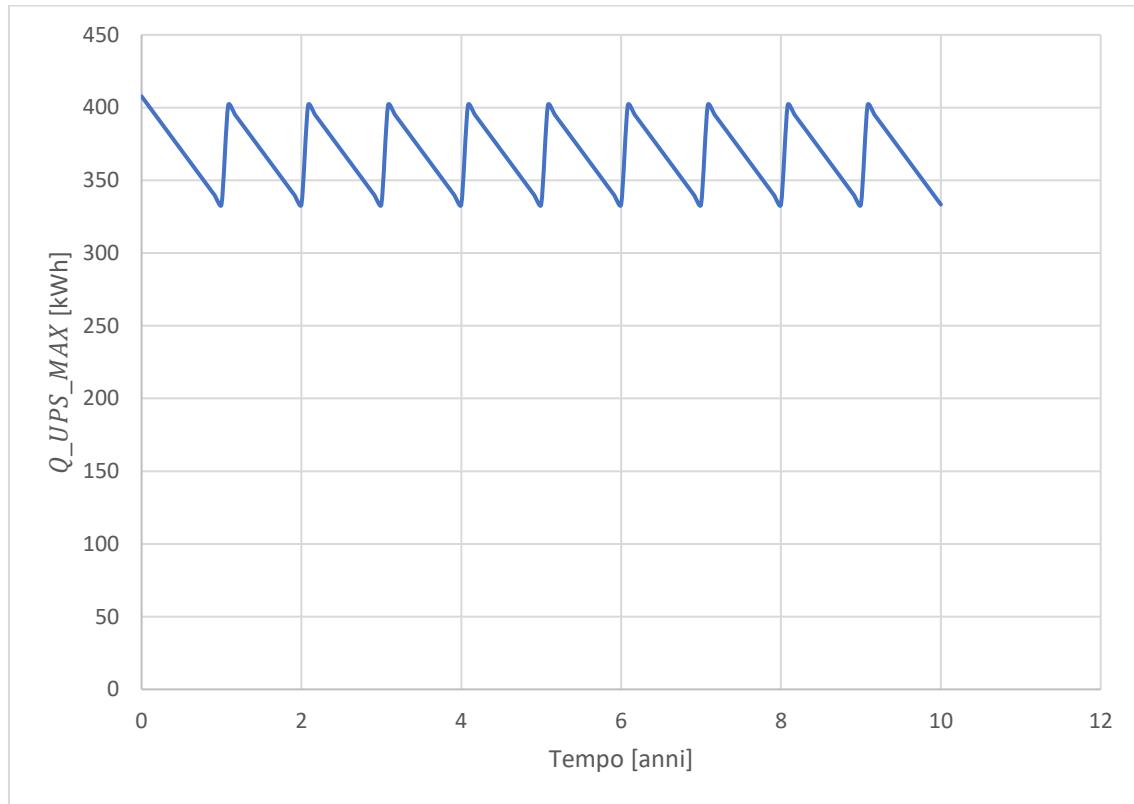


Figura 5.10: Esempio di variazione nel tempo della capacità di carica di un accumulatore tra il valore massimo e minimo secondo le ipotesi fatte

Al termine di ogni anno, in pratica, l'effettiva perdita di capacità di carica che avrà subito l'accumulatore verrà compensata dall'aggiunta di capacità di carica di un nuovo accumulatore (acquistato), di capacità pari a quella persa.

$Q_{UPS,min}$ corrisponde anche alla carica che l'accumulatore deve fornire al Data Center, maggiorata rispetto alla quantità effettivamente richiesta dal Data Center a causa delle perdite legate al rendimento di scarica.

Si può valutare l'effettiva quantità di energia disponibile in un determinato istante di tempo nell'accumulatore $Q_{disp}(t)$; al tempo di riferimento $t = 0$ (tempo di inizio della simulazione) vale che $Q_{disp}(0) = Q_{UPS,MAX}$. Si ipotizza che ogni volta che l'accumulatore subisce una fase di scarica, non appena possibile, viene caricato nuovamente fino a raggiungere nuovamente la capacità massima di carica. La variazione di Q_{disp} avrà il seguente andamento nel tempo:

$$Q_{disp}(t) = Q_{UPS,MAX} \cdot \left(1 - P_{UPS} \left[\frac{\%}{t} \right] \cdot tempo[t] \right) - \Delta Q_s(t) + \Delta Q_c(t) \quad (47)$$

dove $\Delta Q_s(t)$ è la somma di tutte le energie che sono state rilasciate dall'accumulatore entro il tempo t :

$$\Delta Q_s(t) = N_s(t) \cdot Q_s \quad (48)$$

dove $N_s(t)$ è il numero di scariche avvenute nel tempo t

Q_s è la quantità di energia rilasciata ad ogni fase di scarica

$\Delta Q_c(t)$ è la somma di tutte le energie che sono state prelevate dall'accumulatore entro il tempo t

$$\Delta Q_c(t) = N_c(t) \cdot Q_c \quad (49)$$

dove $N_c(t)$ è il numero di cariche avvenute entro il tempo t

Q_c è la quantità di energia prelevata ad ogni fase di carica

5. Metodologia di analisi proposta

Una volta terminata la fase di scarica, nell'intervallo di tempo che intercorre prima della successiva fase di carica, ossia quando $N_s(t) = N_c(t) + 1$, nell'accumulatore può rimanere immagazzinata una piccola quantità di energia, ricavabile comunque sempre dall'equazione (47).

Durante la fase di scarica, l'accumulatore dovrà fornire al Data Center un'energia pari a:

$$Q_s = \frac{Q_{DC}}{\eta_s} = Q_{UPS,min} \quad (50)$$

e il Data Center riceverà un'energia pari a Q_{DC} ; sarà stata quindi dissipata un'energia pari a:

$$Q_{diss,s} = \frac{Q_{DC}}{\eta_s} - Q_{DC} = Q_{DC} \cdot \left(\frac{1}{\eta_s} - 1 \right) = Q_{DC} \cdot \left(\frac{1 - \eta_s}{\eta_s} \right) \quad (51)$$

Durante la fase di carica, l'accumulatore riceverà dalla rete elettrica un'energia Q_c pari a quella che ha ceduto precedentemente al Data Center:

$$Q_c = Q_s \quad (52)$$

la rete elettrica dovrà fornire però un'energia pari a:

$$Q_{rete,UPS} = \frac{Q_c}{\eta_c} = \frac{Q_s}{\eta_c} = \frac{Q_{DC}}{\eta_s \cdot \eta_c} \quad (53)$$

dove η_c è il rendimento di carica; sarà stata quindi dissipata un'energia pari a:

$$\begin{aligned} Q_{diss,c} &= \frac{Q_c}{\eta_c} - Q_c = Q_c \cdot \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right) = Q_c \cdot \left(\frac{1 - \eta_c}{\eta_c} \right) \\ &= Q_s \cdot \left(\frac{1 - \eta_c}{\eta_c} \right) \end{aligned} \quad (54)$$

Calcolo DOD e perdite capacità di carica

Per calcolare il corretto valore di P_{s-d} e P_{ciclo} , sia per i calcoli del dimensionamento dell'accumulatore che per i costi operativi, viene seguito il seguente procedimento ricorsivo:

1. Si ipotizza DOD = 100 [%]
2. Si calcola la SOC media per una giornata di regolazione:

$$\overline{SOC_{reg}} [\%] = \frac{2 \cdot t_{reg} \cdot \frac{100 - (100 - DOD)}{2} + (24 - 2 \cdot t_{reg}) \cdot 100}{24} \quad (55)$$

dove si considera una C_{rate} di carica e scarica circa pari a $\frac{1}{t_{reg}}$

3. Si calcola la SOC media annua:

$$\overline{SOC_a} [\%] = \frac{n_{reg} \cdot \overline{SOC_{reg}} + (365 - n_{reg}) \cdot 100}{365} \quad (56)$$

4. Si calcola la P_{s-d} media annua: $\overline{P_{s-d}}$

dove si utilizza la Tabella 5.5 (Temperatura, $\overline{SOC} \rightarrow P_{s-d}$)

5. Si calcola il numero di cicli vita N_c

dove si utilizza la

Tabella 5.4 (DOD $\rightarrow N_c$)

6. Si calcola la P_{ciclo} media annua:

$$\overline{P_{ciclo}} \left[\frac{\%}{anno} \right] = 1 \left[\frac{ciclo}{giorno} \right] \cdot \frac{(100 - 70)[\%]}{N_c [cicli]} \cdot 365 \left[\frac{giorni}{anno} \right] \quad (57)$$

5. Metodologia di analisi proposta

dove si ipotizza che avviene una regolazione al giorno per tutti i giorni dell'anno

7. Si calcola la perdita di capacità di carica media annua \bar{P} :

$$\bar{P} = \frac{n_{reg} \cdot \overline{P_{ciclo}} + (365 - n_{reg}) \cdot \overline{P_{s-d}}}{365} \quad (58)$$

8. Si calcola il nuovo valore di DOD:

$$DOD = 100 - \frac{\bar{P}}{2} \quad (59)$$

Si confronta quindi il valore di DOD del punto 8 con quello del punto 1; se la differenza % tra i due valori risulta superiore ad una determinata tolleranza (ipotizzata pari a 0,1%) allora si reitera il ciclo ripartendo dal punto 2 e il valore di DOD del punto 8 va a sostituire quello del punto 1; se la differenza % tra i due valori risulta invece essere inferiore al limite di tolleranza, si chiude il ciclo e i valori di interesse dell'ultima iterazione saranno quelli che verranno utilizzati per i calcoli di analisi tecnico-economica.

Per ogni coppia di valori (n_{reg}, t_{reg}) si otterranno i seguenti valori di interesse: $DOD, \overline{P_{ciclo}}, \overline{P_{s-d}}$, dove $\overline{P_{ciclo}}, \overline{P_{s-d}}$ rappresentano i nuovi valori di P_{ciclo}, P_{s-d} . In Tabella 5.6 sono riportati i risultati di P_{ciclo}, P_{s-d} espressi in termini di [%/anno] e il risultato di DOD per le seguenti combinazioni di n_{reg} e t_{reg} :

- tre valori di durata temporale per un singolo intervento:
 - 0.25, 3 e 6 [h]
- tre valori di frequenza media di intervento:
 - 50 interventi all'anno (1 intervento a settimana)
 - 150 interventi all'anno (3 interventi a settimana)
 - 250 interventi all'anno (5 interventi a settimana)

			$t_{reg} [h]$		
			0,25	3	6
n_{reg} $\frac{interventi}{anno}$	50	DOD	93,18%	93,33%	93,48%
		P_{ciclo}	15,87%	15,87%	15,87%
		P_{s-d}	13,28%	12,94%	12,60%
	150	DOD	92,83%	93,08%	93,38%
		P_{ciclo}	15,53%	15,87%	15,87%
		P_{s-d}	13,28%	12,43%	11,40%
	250	DOD	92,50%	92,72%	92,96%
		P_{ciclo}	15,53%	15,53%	15,53%
		P_{s-d}	13,11%	11,74%	10,21%

Tabella 5.6: DOD, Perdita di capacità di carica P_{ciclo} e P_{s-d} [%/anno] al variare del numero e durata degli interventi annui

Per il dimensionamento di un accumulatore si terrà conto:

- della P_{ciclo} , qualora si dovesse offrire un servizio di regolazione
- della P_{s-d} , qualora non si dovesse offrire un servizio di regolazione

In fase di progettazione è da preferire la scelta più conservativa che, da come si può osservare in Tabella 5.6, è quella rappresentata dai valori ottenuti per il caso di 50 interventi all'anno.

Nei costi operativi giornalieri associabili all'UPS, si considerano i valori di P_{ciclo} , P_{s-d} espressi in termine di [%/giorno] e riportati in Tabella 5.7; anche per questo tipo di costo si dovrà tenere conto dei valori più conservativi, riscontrabili per il caso di 0.25 [h] di durata di un singolo intervento.

5. Metodologia di analisi proposta

			$t_{reg} [h]$		
			0,25	3	6
n_{reg} $\frac{interventi}{anno}$	50	P_{s-d}	0,036%	0,035%	0,035%
		P_{ciclo}	0,043%	0,043%	0,043%
	150	P_{s-d}	0,036%	0,034%	0,031%
		P_{ciclo}	0,043%	0,043%	0,043%
	250	P_{s-d}	0,036%	0,032%	0,028%
		P_{ciclo}	0,043%	0,043%	0,043%

Tabella 5.7: Perdita di capacità di carica P_{ciclo} e P_{s-d} [%/giorno] al variare della frequenza di cicli annui e della loro durata

Parametri economici

L'utilizzo di un impianto UPS comporta le seguenti voci di costo:

Il Costo di investimento I_{UPS} , ossia il costo sostenuto per l'acquisto dell'impianto UPS.

Viene calcolato come:

$$I_{UPS} [\text{€}] = \frac{\text{Costo di}}{\text{installazione, UPS}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot Q_{UPS,MAX} [\text{kWh}] \quad (60)$$

L'azienda detrae ogni anno una frazione del costo di questo bene come *ammortamento*; si sceglie un ammortamento a quote costanti, cioè il costo del bene è diviso in quote uguali durante il corso della sua vita. Ogni sua quota di ammortamento vale:

$$I_{amm,UPS} [\text{€}] = I_{UPS} [\text{€}] \cdot \frac{\frac{\text{Durata}}{\text{contratto}} [\text{anni}]}{\frac{\text{Vita utile}}{\text{UPS}} [\text{anni}]} \quad (61)$$

dove la *Vita utile UPS* viene ipotizzata essere pari a 10 [anni].

Sostituendo la (60) nella (61) ed esplicitando la $Q_{UPS,MAX}$, si ottiene la seguente espressione:

$$I_{amm,UPS} [\text{€}] = \frac{\text{Costo di capitale}}{\text{kWh}} \cdot \frac{Q_{DC} [\text{kW}] * PUE * t_{reg} [\text{h}]}{\left(\eta_s [\cdot] \cdot \frac{1 - P_{ciclo} [\%]}{100} \right)} \cdot \frac{\frac{Durata contratto [\text{anni}]}{Vita utile UPS [\text{anni}]}}{}$$
(62)

dove t_{reg} è pari a 0,25 / 3 / 6 ore, a seconda del caso studio

I Costo operativi sono associabili essenzialmente ai costi sostenuti per l'acquisto di corrente elettrica dalla rete durante la fase di carica dell'accumulatore; verranno calcolati quotidianamente alle 23.59 e coincideranno con l'espressione:

$$C_{rete,UPS}(t) \left[\frac{\text{€}}{t} \right] = C_{el} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot Q_{rete,UPS} \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$
(63)

dove C_{el} è il costo dell'energia elettrica prelevata dalla rete

t indica il periodo temporale di riferimento (giorni, anni)

Sostituendo la (53) nella (63) si ottiene la seguente equazione di costo:

$$\begin{aligned} C_{rete,UPS}(t) \left[\frac{\text{€}}{t} \right] &= C_{el} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot \frac{Q_{DC}}{\eta_s \cdot \eta_c} \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right] \\ &= C_{el} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot \frac{Q_{UPS,min}}{\eta_c} \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right] \end{aligned}$$
(64)

Bisognerà inoltre considerare come *costi operativi* anche quelli legati alla perdita di capacità permanente:

$$C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\text{€}}{t} \right] = \frac{\text{Costo di installazione, UPS}}{\text{kWh}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right].$$
(65)

5. Metodologia di analisi proposta

$$\cdot Q_{UPS,MAX} [kWh] \cdot P_{UPS} \left[\frac{\%}{t} \right]$$

A seconda se durante la giornata si fornisca il servizio di regolazione o meno, la P_{UPS} assume rispettivamente il valore di P_{ciclo} o P_{s-d} .

TERNA richiede che per la fornitura del servizio di regolazione debbano essere soddisfatti alcuni requisiti tecnici e funzionali minimi [71]; si avrà quindi un’ulteriore voce di costo, denominato *costo di adeguamento*. Esso vale:

$$\begin{aligned} C_{ad,UPS} [\text{€}] &= C_{ad,imp,UPS} [\text{€}] \cdot \frac{\frac{Durata}{contratto} [anni]}{\frac{Vita utile}{UPS} [anni]} \\ &\quad + C_{ad,op,UPS} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right] \cdot \frac{Durata}{contratto} [anni] \end{aligned} \quad (66)$$

dove $C_{ad,imp,UPS}$ è il *costo di adeguamento impianto* legato agli UPS; consiste nel costo di installazione degli apparati di misura e monitoraggio (es. UPMC), e di sistemi di comunicazione conformi alle specifiche indicate dal gestore di rete. Si ipotizza che esso assuma un valore pari a 10.000 [€]

$C_{ad,op,UPS}$ il *costo di adeguamento operativo* legato agli UPS; le attività di controllo e monitoraggio continuo comportano un consumo di risorse (ore lavoro ed energia) che possono essere ipotizzate pari a 2.000 [€/anno]

5.6 GE

Il **gruppo elettrogeno (GE)** è un sistema composto da un motore primo e un generatore elettrico, tipicamente alimentato a diesel, che fornisce corrente elettrica alle utenze qualora si verificassero delle interruzioni di alimentazione dalla rete.

Si valuterà l'impatto economico di una sua possibile integrazione all'interno dei perimetri geografici dell'UVAC, con l'obiettivo di fornire energia elettrica al Data Center di mining nel periodo in cui quest'ultimo fornisce il servizio di regolazione alla rete di dispacciamento. Qualora il suo utilizzo portasse un valore aggiuntivo a livello economico, si riterrebbe ancora più interessante la possibilità di utilizzare le mining farm come ulteriore risorsa di flessibilità per la rete elettrica nazionale.

Si definisce **rendimento elettrico** di un gruppo elettrogeno (GE) alimentato a combustibile:

$$\text{Rendimento elettrico} = \eta_{el} = \frac{\dot{Q}_{el}}{\dot{Q}_{th}} = \frac{\dot{Q}_{el}}{\dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb}} \quad (67)$$

dove:

\dot{Q}_{el} = potenza elettrica generata dal motore [kW]

\dot{Q}_{th} = potenza termica fornita dalla combustione [kW]

\dot{m}_{comb} = portata massica del combustibile $\left[\frac{kg}{s}\right]$

PCI_{comb} = potere calorifico inferiore del combustibile $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Considerando che per il gasolio (combustibile di nostro interesse) il *potere calorifico inferiore* risulta essere $42.877 \left[\frac{GJ}{ton}\right]$ [72] e la densità $835 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$, riscrivendo la (67) utilizzando i parametri tipici di una scheda tecnica, si ottiene:

$$\eta_{el} = \frac{\dot{Q}_{el} \left[kW\right]}{\dot{m}_{comb} \left[\frac{kg}{s}\right] \cdot PCI_{comb} \left[\frac{kJ}{kg}\right]} =$$

5. Metodologia di analisi proposta

$$= \frac{\dot{Q}_{el} [kW]}{\dot{V}_{comb} \left[\frac{L}{h} \right] \cdot \rho_{comb} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot PCI_{comb} \left[\frac{GJ}{ton} \right] \cdot 10^6 \left[\frac{kJ}{GJ} \right]} \cdot \frac{1000 \left[\frac{L}{m^3} \right] \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{10^3 \left[\frac{kg}{ton} \right]} \quad (68)$$

dove \dot{V}_{comb} è la portata volumetrica del combustibile

ρ_{comb} è la densità del combustibile

L' equazione del rendimento elettrico può essere visto anche come un rapporto di energie:

$$\begin{aligned} \eta_{el} &= \frac{Q_{el} [kJ]}{Q_{th} [kJ]} = \frac{\dot{Q}_{el} [kW] \cdot t_{reg} [h] \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{m_{comb} [kg] \cdot PCI_{comb} \left[\frac{kJ}{kg} \right]} = \\ &= \frac{\dot{Q}_{el} \left[\frac{kJ}{s} \right] \cdot t_{reg} [h] \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{c_g [L] \cdot \rho_{comb} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot PCI_{comb} \left[\frac{GJ}{ton} \right] \cdot 10^6 \left[\frac{kJ}{GJ} \right]} \\ &\quad \cdot \frac{1000 \left[\frac{L}{m^3} \right]}{10^3 \left[\frac{kg}{ton} \right]} \end{aligned} \quad (69)$$

dove: t_{reg} è il numero di ore continuative in cui al gruppo elettrogeno è richiesto di funzionare

c_g è il volume del gasolio consumato nel tempo t_{reg}

Riscrivendo la (69) esplicitando il termine c_g , si ottiene:

$$c_g [L] = \frac{\dot{Q}_{el} \left[\frac{kJ}{s} \right] \cdot t_{reg} [h] \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{\eta_{el} \cdot \rho_{comb} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot PCI_{comb} \left[\frac{GJ}{ton} \right] \cdot 10^6 \left[\frac{kJ}{GJ} \right]} \cdot \frac{1000 \left[\frac{L}{m^3} \right]}{10^3 \left[\frac{kg}{ton} \right]} \quad (70)$$

Volendo esprimere la (70) come funzione del consumo specifico di combustibile nell'unità di tempo [h], risulta:

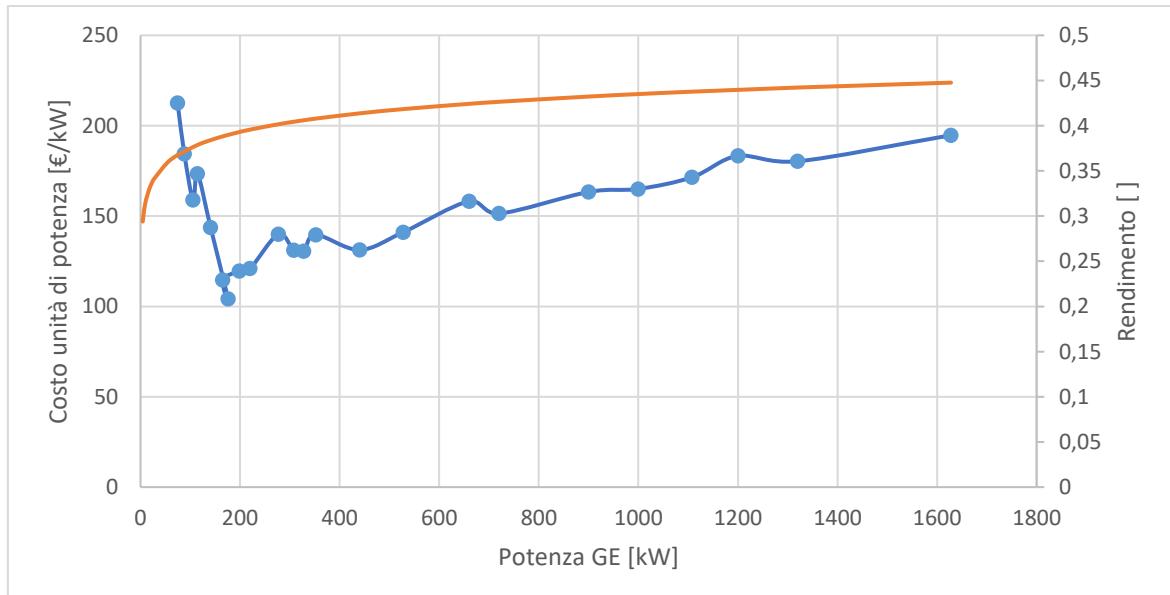
$$c_g[L] = \dot{c}_g \left[\frac{L}{h} \right] t_{reg}[h] \quad (71)$$

dove

$$\dot{c}_g \left[\frac{L}{h} \right] = \frac{\dot{Q}_{el} \left[\frac{kJ}{s} \right] \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{\eta_{el} \cdot \rho_{comb} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot PCI_{comb} \left[\frac{GJ}{ton} \right]} \quad (72)$$

Per stimare i valori di alcuni parametri tecnici che verranno utilizzati per il gruppo elettrogeno riferente le diverse simulazioni, si estrapolano i dati di GE di taglie diverse venduti attualmente [73].

Graficando l'andamento della linea di tendenza logaritmica che meglio interpola i valori di rendimento elettrico (questi ultimi ricavati applicando la (68) ai dati trovati) si ottiene la curva arancione di Figura 5.11. Nella stessa figura viene riportando anche l'andamento del costo per unità di potenza dei vari GE (in azzurro).



5. Metodologia di analisi proposta

Figura 5.11: Andamento della linea di tendenza logaritmica del rendimento (in arancione) e del costo su unità di potenza (in azzurro) di un GE

In figura sopra si può notare che il *rendimento* cresce logaritmicamente andando dalle basse alle alte potenze, raggiungendo valori molto elevati (quasi 0.45) per i gruppi elettrogeni di più elevata potenza. I *costi per unità di potenza* di un gruppo elettrogeno tendono invece a diminuire all'aumentare della potenza, raggiungendo un valore minimo di circa 105 [€/kW] per una potenza di 180 [kW], superata la quale tornano a salire andando a sfiorare i 200 [€/kW] alle massime potenze disponibili.

In Figura 5.12 vengono invece riportate le capacità dei serbatoi dei gruppi elettrogeni presi in considerazione:

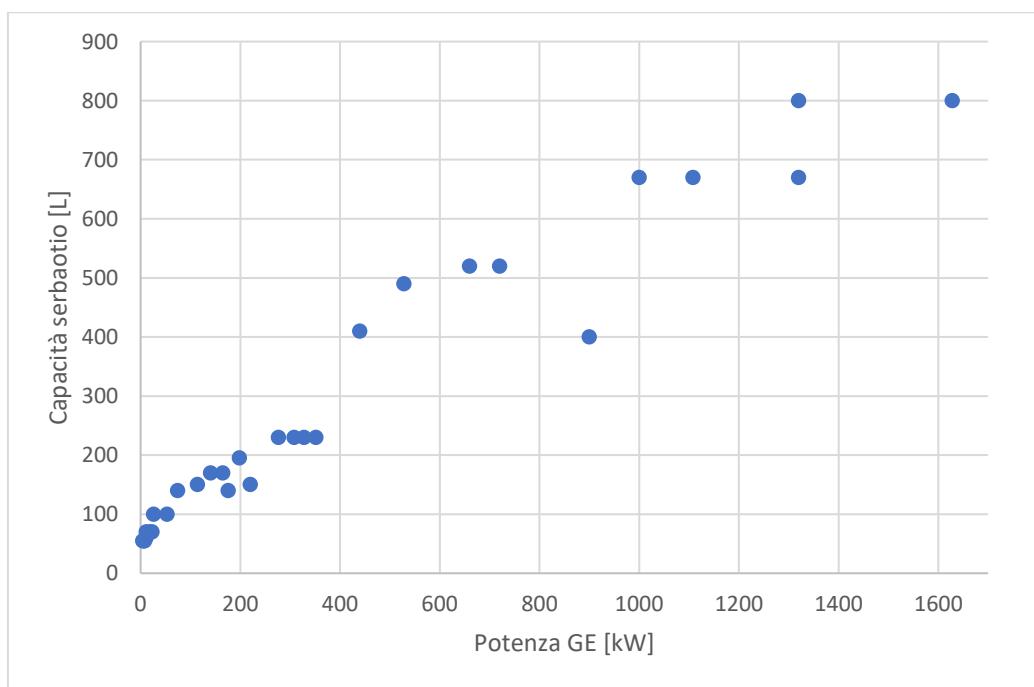


Figura 5.12: Capacità del serbatoio al variare della potenza del GE

In Figura 5.12 si può notare come all'aumentare della potenza del GE tende a crescere linearmente la capacità del serbatoio.

Considerati i riscontri fin qui avuti relativi ad alcuni parametri tecnici, si vuole dimensionare un gruppo elettrogeno che fornisce energia elettrica ad un Data Center (DC).

Il GE nel suo complesso può essere composto da più unità di GE disposte in parallelo; l'impiego di gruppi elettrogeni in parallelo rispetto a un singolo gruppo elettrogeno di grandi dimensioni comporta vantaggi e svantaggi [74].

Vantaggi:

- migliore affidabilità del sistema
- minore costo di investimento
- possono non servire supporti strutturali aggiuntivi
- maggiore flessibilità nella scelta degli spazi di installazione
- utilizzo di cavi di dimensioni inferiori e terminali più semplici
- componenti di ricambio meno costosi

Svantaggi:

- può essere necessaria la realizzazione di varie solette di cemento
- maggiore spazio occupato
- posa di cavi aggiuntivi
- maggiori costi di messa in servizio (avvio e collaudo)
- maggiori richiesta di manodopera

In prima analisi si ipotizza che il GE nel suo complesso possa essere costituito da più unità di singoli GE disposti in parallelo e nello specifico non più di 4.

Si può ipotizzare che il GE sia dimensionato per fornire il 100% del prelievo di picco delle apparecchiature IT del Data Center e l'energia richiesta dai carichi ausiliari (sistemi di climatizzazione e illuminazione).

TERNA richiede, nella fattispecie del progetto pilota UVAC, di poter rendere disponibile la potenza dichiarata per almeno 3 ore dalle 14.00 alle 20.00 da lunedì a venerdì, garantendo un premio fisso di 30.000 [€/MW/anno] e uno variabile massimo di 400 [€/MWh]; nel caso in cui si rendesse disponibile la variazione del proprio carico per l'intera fascia oraria prevista (6 ore), il premio fisso raddoppierebbe. Considerando per entrambi i casi il supporto

5. Metodologia di analisi proposta

di una unità di UPS tale da fornire la potenza necessaria per 15 minuti a partire dall’istante iniziale dell’interruzione, la durata della richiesta di potenza al GE si ridurrebbe da 3 ore a 2 ore e 45 minuti per il primo caso e da 6 ore a 5 ore e 45 minuti per il secondo caso.

Si vuole quindi valutare il funzionamento di un GE che fornisce un servizio di regolazione per 2,75 ore e 5,75 ore, a cui si aggiungeranno 0,25 ore di energia fornita dall’UPS (maggiori dettagli del capitolo successivo).

Assumendo un DC di 1 [MW] di potenza installata e considerando un sovrardimensionamento del 10% del GE (a titolo cautelativo), in funzione delle ore continuative a cui il GE può essere chiamato a lavorare, quest’ultimo dovrà essere progettato per fornire la quantità di energia indicata in *Tabella 5.8*.

t_{reg} [h]	Energia richiesta dal DC [kWh]	Energia disponibile dal GE [kWh]
5,75	5750	6325
2,75	2750	3025

Tabella 5.8: Energia disponibile dal GE in funzione delle ore continuative a cui sarà chiamato a funzionare

Si sceglie come *potenza di riferimento* quella richiesta dal Data Center sovrardimensionata del 10%, ossia 1100 [kW]; se il DC dovesse richiedere tale potenza per 1 [h] di tempo, il GE dovrebbe fornire una quantità di energia pari a 1100 [kWh]. Dividendo in 4,3,2,1 parti uguali questa potenza si ottengono rispettivamente i valori 275 [kW], 334 [kW], 550 [kW], 1100 [kW] di potenza. In Tabella 5.9. sono riportati i valori di rendimento elettrico η_{el} , costo su unità di potenza e capacità del serbatoio per le 4 unità di GE appena indicate. Il rendimento elettrico e il costo su unità di potenza sono stati ottenuti a partire dal grafico di Figura 5.11; per i valori di capacità del serbatoio, invece, sono stati utilizzati i valori tipicamente riscontrabili associabili a quella potenza.

Potenza singola unità GE [kW]	η_{el} []	Costo su unità di potenza [€/kW]	Capacità serbatoio [L]
275	0,4	125	230
334	0,405	135	270
550	0,42	145	490
1100	0,435	170	670

Tabella 5.9: Caratteristiche tecniche singole unità del GE utilizzabili

Le 4 tipologie riportate in *Tabella 5.9* presentano ottimi rendimenti elettrici (superiori a 0,4) e buone caratteristiche di costo.

La scelta del GE

Si ipotizza, per semplicità, che il gruppo elettrogeno nel suo complesso si componga di unità di potenza che appartengano ad una sola delle classi viste in *Tabella 5.9* e che, per queste ultime, sia garantita un'autonomia di almeno 3 ore al 100% del carico; si stima inoltre che il GE abbia una vita utile di 20 anni.

Affinché un determinato GE possa essere utilizzato, deve essere in grado di fornire l'energia richiesta nell'arco dell'intera durata dell'intervento, consumando una quantità di combustibile inferiore al volume del serbatoio.

Una volta che questa condizione viene rispettata, le varie combinazioni possibili di numero e potenza delle unità di cui si compone il GE subiscono un'ulteriore selezione, quella dei costi.

Ipotizzando che il GE, una volta che intervenga, fornisca sempre la potenza per il quale è stato dimensionato, confrontando i costi totali di ogni possibile combinazione tra il numero di unità di cui si compone il GE (se ne stabiliscono un massimo di 4, funzionanti in parallelo) e le possibili potenze che possono assumere, si ottengono i risultati riportati in *Tabella 5.10*, *Tabella 5.11* e *Tabella 5.12*, dove il parametro “*costo totale*” viene definito nella sezione “Parametri economici”.

5. Metodologia di analisi proposta

I calcoli sono stati effettuati per:

- tre valori del prezzo del gasolio che racchiudono qualsiasi valore del prezzo del gasolio da riscaldamento riscontrato dal 2013 ad oggi:
 - 1, 1,25 e 1,5 [€/L]
- due valori di durata temporale di un singolo intervento (2,75 e 5,75 [h]);
- tre valori di frequenza media di intervento:
 - 50 interventi all'anno (1 intervento a settimana)
 - 150 interventi all'anno (3 interventi a settimana)
 - 250 interventi all'anno (5 interventi a settimana)

		Prezzo gasolio [€/L]			
		1	1,25	1,5	
t_{reg} [h]	2,75	4	2	2	N. unità del GE [unità]
		275	550	550	Potenza su singola unità del GE [kW/unità]
		€ 557.743	€ 659.789	€ 759.847	Costo totale [€]
t_{reg} [h]	5,75	3	3	3	N. unità del GE [unità]
		550	550	550	Potenza su singola unità del GE [kW/unità]
		€ 1.076.098	€ 1.285.310	€ 1.494.522	Costo totale [€]

Tabella 5.10: Risultati caratteristiche GE per 50 interventi all'anno

		Prezzo gasolio [€/L]			
		1	1,25	1,5	
t_{reg} [h]	2,75	1	1	1	N. unità del GE [unità]
		1100	1100	1100	Potenza su singola unità del GE [kW/unità]
		€ 1.346.291	€ 1.636.114	€ 1.925.937	Costo totale [€]
	5,75	3	3	3	N. unità del GE [unità]
		550	550	550	Potenza su singola unità del GE [kW/unità]
		€ 2.749.793	€ 3.377.429	€ 4.005.065	Costo totale [€]

Tabella 5.11: Risultati caratteristiche GE per 150 interventi all'anno

		Prezzo gasolio [€/L]			
		1	1,25	1,5	
t_{reg} [h]	2,75	1	1	1	N. unità del GE [unità]
		1100	1100	1100	Potenza su singola unità del GE [kW/unità]
		€ 2.119.152	€ 2.602.191	€ 3.085.229	Costo totale [€]
	5,75	2	2	2	N. unità del GE [unità]
		1100	1100	1100	Potenza su singola unità del GE [kW/unità]
		€ 4.413.955	€ 5.423.944	€ 6.433.933	Costo totale [€]

Tabella 5.12: Risultati caratteristiche GE per 250 interventi all'anno

Nel caso in cui il Data Center di mining fornisse un servizio di flessibilità a TERNA utilizzando un Gruppo Elettrogeno, la scelta delle caratteristiche tecniche del Gruppo Elettrogeno dipenderanno, come evidenziato in *Tabella 5.10*, *Tabella 5.11* e *Tabella 5.12*,

5. Metodologia di analisi proposta

dal prezzo del gasolio, dalla frequenza media di intervento e dalla durata del singolo intervento.

I valori del *prezzo del gasolio* da riscaldamento saranno quelli forniti su base mensile dal sito del Ministero dello sviluppo economico [75].

Per il caso in cui il titolare si rende disponibile nel periodo indicato da TERNA a fornire un servizio di flessibilità per non più di **3 ore** al giorno, si può notare in *Tabella 5.10, Tabella 5.11* e *Tabella 5.12* che, indipendentemente dal prezzo del gasolio, per una frequenza di 3 o più interventi a settimana risulta economicamente più vantaggiosa la scelta di investire in 1 unità di GE da 1100 [kW] di potenza; per una frequenza di 1 intervento a settimana risulta invece generalmente più economica l'installazione di 2 unità di GE da 550 [kW] ciascuna.

Per il caso in cui il titolare si rende invece disponibile a fornire un servizio di flessibilità per l'intera fascia oraria indicata da Terna, ossia **6 ore**, al fine di ottenere la maggiorazione del premio fisso, indipendentemente dal prezzo del gasolio, per una frequenza di 5 interventi a settimana risulta economicamente più conveniente la scelta di 2 unità di GE da 1100 [kW] ciascuna, mentre per una frequenza da 1 a 3 interventi è più conveniente la scelta di 3 unità da [550 kW].

Non sapendo quante regolazioni verranno fatte mediamente durante l'anno è preferibile optare per la scelta più conservativa, ossia quella che prevede la maggiore frequenza di interventi a settimana. Nel caso di interventi di regolazione della durata di 3 ore si opterà quindi per un'installazione di 1 unità da 1100 [kW] di potenza anche se, qualora dovessero verificarsi meno interventi, questa scelta risulterebbe economicamente meno conveniente; nel caso di interventi di regolazione della durata di 6 ore, si opterà invece per l'installazione di 2 unità da 1100 [kW] di potenza che, solo se si avesse una media di 1 intervento a settimana, risulterebbe meno economica.

Parametri economici

I parametri economici legati all'acquisto e la gestione di un GE per la fornitura di un servizio di regolazione a TERNA per il tramite di un Data Center sono:

Il Costo di investimento del Gruppo Elettrogeno che si calcola come:

$$I_{GE} [\text{€}] = n_{u,GE} [\text{unità}] \cdot \dot{Q}_{el,u,GE} \left[\frac{kW}{\text{unità}} \right] \cdot C_{GE} \left[\frac{\text{€}}{kW} \right] \quad (73)$$

dove: $n_{u,GE}$ è il numero di unità di cui si compone il GE

$\dot{Q}_{el,u,GE}$ è la potenza elettrica di ogni singola unità del GE

C_{GE} è il costo su unità di potenza del GE per la particolare unità di GE scelta

La sua quota di ammortamento vale:

$$I_{amm,GE} [\text{€}] = n_{u,GE} [\text{unità}] \cdot \dot{Q}_{el,u,GE} \left[\frac{kW}{\text{unità}} \right] \cdot C_{GE} \left[\frac{\text{€}}{kW} \right] \cdot \frac{\frac{Durata}{contratto} [\text{anni}]}{\frac{Vita utile}{GE} [\text{anni}]} \quad (74)$$

dove la *vita utile* del GE è impostata pari a 20 anni

I Costi operativi sono essenzialmente legati al costo del consumo di combustibile diesel; nel corso dell'anno essi si calcolano dalla seguente equazione:

$$C_{fuel}[\text{€}] = \sum_{t=0}^n \frac{C_{fuel}(t)}{(1+i)^t} \quad (75)$$

dove: i è il tasso di attualizzazione, ipotizzato pari al 6% annuo [76]

t è la scadenza temporale

n è la vita utile del GE espressa in [giorni]

$C_{fuel}(t)$ è il costo del gasolio per ogni singola operazione di intervento della durata di $t_{reg,GE}$. Si calcola come:

5. Metodologia di analisi proposta

$$C_{fuel}(t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = P_{fuel} \left[\frac{\text{€}}{L} \right] \cdot c_g \left[\frac{L}{h} \right] \cdot t_{reg,GE} \left[\frac{h}{\text{giorno}} \right] \quad (76)$$

dove P_{fuel} è il prezzo del gasolio (da riscaldamento) [75]

" t " sta ad indicare lo specifico momento in cui viene comprato il combustibile per poter riempire il serbatoio di gasolio. Si ipotizza che esso venga comprato il giorno stesso in cui venga fornito il servizio di regolazione.

Il Costo totale " C_{tot} " si calcola come:

$$C_{tot} [\text{€}] = I [\text{€}] + C_{fuel} (t) [\text{€}] \quad (77)$$

ossia la somma del costo di investimento e del costo del gasolio.

Il Costo di adeguamento

Come gli UPS, anche i GE necessitano di ulteriori costi legati al raggiungimento di requisiti minimi funzionali richiesti da TERNA; essi assumono la seguente espressione, analoga a quella degli UPS:

$$C_{ad,GE} [\text{€}] = C_{ad,imp,GE} [\text{€}] \cdot \frac{\frac{Durata}{contratto} [\text{anni}]}{\frac{Vita utile}{UPS} [\text{anni}]} + C_{ad,op,GE} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right] \quad (78)$$

$$\cdot \frac{Durata}{contratto} [\text{anni}]$$

dove $C_{ad,imp,GE}$ è il *costo di adeguamento impianto* legato al GE; consiste nel costo di installazione degli apparati di misura e monitoraggio (es. UPMC) e di sistemi di comunicazione conformi alle specifiche indicate dal gestore di rete. Si ipotizza che

esso assuma un valore pari a 15.000 [€] (viene considerato indirettamente anche quello legato all'UPS dimensionato per 0,25 ore)

$C_{ad,op,GE}$ il *costo di adeguamento operativo* legato al GE; le attività di controllo e monitoraggio continuo comportano un consumo di risorse (ore lavoro ed energia) che possono essere ipotizzate pari a 3.000 [€/anno] (viene considerato indirettamente anche quello legato all'UPS dimensionato per 0,25 ore)

5.7 Caso con regolazione

Si vuole valutare la possibilità che il DC di mining possa fornire il servizio di regolazione alla rete di dispacciamento, per il tramite del MSD. I risultati ottenuti attraverso le varie configurazioni proposte nel paragrafo, oltre a dare un primo resoconto di fattibilità tecnico-economica del progetto, permetteranno di verificare quale possa essere l’alternativa impiantistica migliore, tale da stimolare il titolare del DC a fornire questa nuova risorsa di flessibilità.

La scelta tra le varie alternative impiantistiche studiate si basano sulla possibilità di fornire o meno energia al DC durante l’intera durata del servizio di flessibilità: mentre il Data Center azzera il prelievo di energia dalla rete durante il servizio, una fonte di energia interna al perimetro geografico dell’UVAC continuerebbe ad alimentarlo, permettendogli di continuare a svolgere la sua normale attività industriale. I costi operativi legati ai diversi impianti utilizzati (UPS/sistema di accumulo o Gruppo Elettrogeno) andranno però ad influenzare il valore di offerta minima che il titolare proporrà in sede ex-ante del MSD; in generale, il valore di questa offerta dovrà essere tale da bilanciare i costi sostenuti durante lo svolgimento del servizio di regolazione (presupponendo sempre un’offerta giornaliera di almeno 400 €/MWh).

La modalità di partecipazione di una UVAC è stata discussa in 2.4.2.3 UVAC; per ottenere la qualifica di UVAC, uno o più impianti di consumo appartenenti alla medesima unità di consumo (UC) dovranno essere in grado di ridurre il proprio prelievo (o equivalentemente incrementare la propria immissione) per un valore non inferiore alla quantità minima totale

5. Metodologia di analisi proposta

di 1 [MW], entro 15 minuti dalla ricezione dell'ordine di dispacciamento di Terna e sostenere tale riduzione per almeno 3 ore consecutive nella fascia oraria 14.00 – 20.00 di tutti i giorni compresi tra lunedì e venerdì. Sarebbe quindi possibile associare più Data Center di mining ad una singola UVAC, qualora la loro somma di potenza installata soddisfi i requisiti minimi richiesti, purché risiedenti nello stesso perimetro di aggregazione e appartenenti alla medesima zona di mercato; per comodità, si considera un solo Data Center di mining di potenza installata pari a 1 [MW] connesso in MT.

Una volta ottenuta la qualifica di UVAC, il Data Center di mining potrà partecipare al MSD ma non risulterà abilitato alla partecipazione ai mercati dell'energia; potrà comunque svolgere il servizio di regolazione dello sbilanciamento “sotto le vesti” di Unità di Consumo (UC).

La controparte per la fornitura delle risorse di dispacciamento, responsabile per il mancato rispetto degli ordini di dispacciamento, è il BSP (Balance Service Provider).

Il Data Center di mining avrà una Potenza Massima di Controllo (PMC), ossia la massima quantità di prelievo che può essere modulata in riduzione e che il soggetto intende rendere disponibile quale risorsa di dispacciamento, pari ad 1 [MW]. Si ipotizza, inoltre, che il valore di Potenza Minima, ossia la minima quantità di prelievo che può essere modulata in riduzione, sia anch'essa pari ad 1 [MW]. Durante il servizio di regolazione, quindi, essendo la potenza installata pari ad 1 [MW], il Data Center ridurrà la potenza elettrica assorbita dalla rete fino ad azzerarne questo valore.

In seguito all'abilitazione al MSD, il Data Center di mining potrà fornire il servizio di:

- *Riserva terziaria di potenza a salire*, nella tipologia “riserva di sostituzione”
- *Bilanciamento*

Non potrà invece essere abilitato alla fornitura delle altre risorse per il dispacciamento.

TERNA potrà allocare riserva terziaria di potenza a salire accettando le offerte fatte nella fase ex-ante del MSD; essa potrà poi attivare tali risorse e richiederne delle altre in tempo reale nella fase di bilanciamento del MSD. L'attivazione avviene tramite ordini di dispacciamento inviati direttamente al sito oggetto della fornitura del servizio. Al termine del servizio di regolazione verrà poi emesso da parte di Terna un ordine di revoca o un ulteriore ordine di dispacciamento; nel caso di ordine di revoca, non essendo obbligatorio il

ripristino del prelievo al valore precedente la ricezione dell'ordine, a seconda della condizione di profitto positivo o negativo in cui si trova il processo di mining si tornerà ad assorbire rispettivamente il valore massimo o minimo di corrente (in quest'ultimo caso esso sarà pari a zero). Ipotizzando che le macchine di mining non siano regolabili, ossia che si possano trovare solamente negli stati ON o OFF (acceso o spento), nel caso in cui il processo di mining stesse portando ad un profitto positivo, esse verrebbero mantenute sempre nello stato ON; contrariamente, invece, qualora il processo di mining stesse comportando un profitto negativo, esse verrebbero mantenute nello stato OFF (spento) perché il loro funzionamento porterebbe solamente ad una perdita economica. Questo è possibile perché, per il servizio di riserva terziaria, è definito (per le UVAC) un programma vincolante sempre pari a zero [77] e quindi il prelievo di potenza elettrica è libero da ogni vincolo; siccome, per il servizio di bilanciamento, TERNA considera validi i dati tecnici dichiarati almeno 30 minuti prima dell'ordine di dispacciamento, qualora si stesse avendo un profitto di mining negativo, nel periodo di possibile regolazione (da lunedì a venerdì) si passerebbe dallo stato OFF allo stato ON preventivamente 1 ora prima dell'inizio del servizio (h. 13.00), rimanendoci fino al termine della fascia oraria di possibile regolazione (h. 20.00); superato questo orario, l'impianto tornerebbe allo stato di OFF. Sarebbe comunque opportuno verificare la fattibilità di questa modalità di funzionamento.

Il profilo di carico qualitativo di un'UVAC in seguito alla ricezione di un ordine di dispacciamento sarà il seguente:

5. Metodologia di analisi proposta

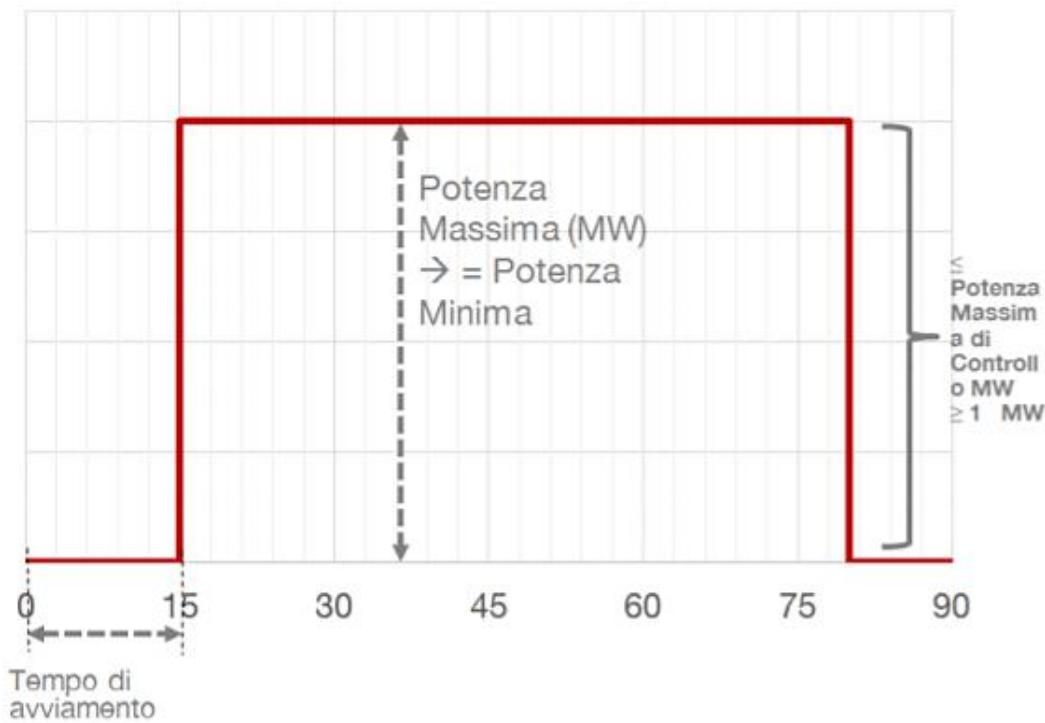


Figura 5.13: Profilo qualitativo variazione di potenza Data Center di mining in seguito a ricezione ordine di dispacciamento

Esso differisce rispetto a quello proposto in Figura 2.9 di pagina 41 perché per un Data Center sono trascurabili le inerzie termiche e meccaniche che altrimenti porterebbero alla creazione di una rampa a salire e a scendere. A partire dalla ricezione dell'ordine di dispacciamento, l'intera banda di regolazione potrà essere fornita in qualsiasi momento, entro comunque i 15 minuti previsti; un successivo ordine di dispacciamento, atto a definire la fine del servizio di regolazione, porterà il titolare a ripristinare eventualmente la condizione iniziale.

L'allocazione di riserva terziaria non dà luogo a remunerazione economica mentre l'attivazione in tempo reale della medesima sì. Prima dell'inizio dell'operatività dell'UVAC, il titolare presenta un'offerta predefinita di 400 [€/MWh] (valore di *strike price*); tali offerte saranno utilizzate in assenza di offerte quotidiane, presentabili durante la seduta di raccolta delle offerte MSD del giorno precedente quello a cui le offerte si riferiscono per la *fase di programmazione* del MSD o per il giorno corrente a cui le offerte si riferiscono per la *fase di bilanciamento (MB)* del MSD. L'offerta presentata consiste in una coppia Quantità –

Prezzo di energia messa a disposizione per l'incremento di immissione (corrispondente alla riduzione di prelievo) per ciascuna ora della giornata successiva (per la *fase di programmazione*) e per ciascuna ora del blocco di quattro ore di ogni sessione MB (per la *fase di bilanciamento*).

La **remunerazione** per il servizio fornito comprende:

- una *componente fissa*, definita in esito ad un'asta al ribasso con valorizzazione di tipo “pay as bid” rispetto a una base di 30.000 [€/MW/anno];
- una *componente variabile*, riconosciuta con riferimento alle sole quantità accettate su MSD e solo in caso di attivazione delle risorse, non superiore allo “strike price” imposto pari a 400 [€/MWh].

Dai dati riportati in Tabella 2.4**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** di pagina 43, si può verosimilmente assumere che il valore della componente fissa sia pari a 30.000 [€/MW/anno]; qualora il soggetto responsabile si rendesse disponibile (tramite offerta opportuna) a fornire il servizio di regolazione per l'intera fascia oraria, Terna, nell'ottica del progetto pilota, fornirebbe una remunerazione fissa del 200% rispetto all'assegnazione dell'asta a ribasso, ossia 60.000 [€/MW/anno]. L'offerta dovrà comunque essere fatta per almeno il 70% dei giorni del periodo di validità, pena il mancato riconoscimento del corrispettivo fisso.

Si ipotizza che quotidianamente venga fatta un'offerta e che il servizio venga sempre rispettato; Terna, alla fine del mese, pagherà una *quota mensile* della componente fissa, pari a $\frac{\text{Componente fissa}}{12}$ qualora venga stipulato un contratto annuale e $\frac{\text{Componente fissa}}{6}$ qualora il contratto stipulato sia semestrale.

Al fine di semplificare i conti si introducono ulteriori **ipotesi di sistema**:

- **Non si hanno penali contrattuali**: il Data Center si deve trovare in condizione di *Ridondanza “in standby”*, ossia se si dovessero verificare dei guasti a uno o più miner, qualora non venissero risolti entro la ricezione di un ordine di dispacciamento, al loro posto entrerebbero in servizio miner obsoleti (efficienza inferiore), utilizzati ad esempio nel precedente ciclo di vita, tali da prelevare la medesima potenza delle unità sostituite, consentendo di evitare penali contrattuali.

5. Metodologia di analisi proposta

- Non si considerano momentanee indisponibilità dovute a guasti nelle macchine: si ipotizza un elevato grado di affidabilità dei miner in esercizio e riparazioni e/o sostituzioni effettuate nel più breve tempo possibile tali da poter considerare il valore di efficienza medio del Data Center circa costante.
- Servizio di regolazione ideale: l'ordine di dispacciamento viene eseguito sempre con successo e la potenza totale prelevata dall'UVAC si riduce dell'esatta quantità di potenza richiesta da TERNA.

Si ipotizza inoltre che, qualora l'offerta quotidiana venga accettata e attivata, TERNA invii non più di un ordine di dispacciamento al giorno (più quello di revoca) per richiedere un servizio di regolazione della durata di 3 o 6 ore, a seconda della disponibilità fornita, da effettuare all'interno dell'intervallo temporale di possibile regolazione (14.00 – 18.00 da lunedì a venerdì). Il Data Center di mining dovrà tenersi a disposizione nel fornire il servizio di flessibilità all'interno di quella fascia oraria. Per semplicità, si considera che tutte le offerte accettate in fase ex-ante MSD vengano poi attivate.

Nei diversi progetti pilota finora susseguitosi sono stati firmati contratti con TERNA per la fornitura del servizio di flessibilità per durate temporali di circa 3 mesi; è possibile ipotizzare quindi che, qualora questi test diano esiti positivi, tale intervallo contrattuale venga allungato; nelle successive simulazioni si valuteranno i risultati economici ottenuti per contratti stipulati con durata di 6 mesi e 1 anno.

5.7.1 Dati di Input

Rispetto al paragrafo 5.2.1, nella simulazione sono previsti questi ulteriori dati di input:

Dati storici

Dati storici primitivi

- Costo del gasolio da riscaldamento $\left[\frac{\text{€}}{\text{L}}\right]$

Dati di sistema

Servizio al MSD

- Ore durata intervento di regolazione [h]
- Costo adeguamento operativo $\left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$
- Costo adeguamento impianto [€]
- Componente fissa $\left[\frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{anno}} \right]$
- Offerta minima $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$
- Incremento rispetto offerta minima $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$
- Prezzo offerta se profitto negativo $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$

I costi di adeguamento operativo e impianto si ipotizza, nel caso in cui venga fornito il servizio di regolazione senza l'utilizzo di UPS o GE, assumano gli stessi valori ipotizzati per l'UPS.

La componente fissa è la quota fissa della remunerazione ottenuta da TERNA per il servizio di regolazione fornito.

Gli ultimi 3 parametri verranno invece descritti nel successivo capitolo.

Si introducono, inoltre, altre due categorie di dati di sistema per il Data Center che fornisce il servizio di regolazione: "UPS" e "GE"; i vari parametri introdotti verranno solo menzionati perché già stati descritti nei rispettivi paragrafi (5.5 e 5.6).

UPS

- Costo di installazione $\left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$
- Vita utile [anni]
- Rendimento carico []
- Rendimento scarico []
- Perdita capacità di carica annuo con regolazione $\left[\frac{\%}{\text{anno}} \right]$
- Perdita capacità di carica annuo senza regolazione $\left[\frac{\%}{\text{anno}} \right]$

5. Metodologia di analisi proposta

- Costo adeguamento operativo $\left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$
- Costo adeguamento impianto [€]
- Ore durata intervento regolazione [h]

GE

- Potenza per unità installata $\left[\frac{kW}{\text{unità}} \right]$
- Vita utile [anni]
- Costo per unità di potenza $\left[\frac{\text{€}}{kW} \right]$
- Costo adeguamento operativo $\left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$
- Costo adeguamento impianto [€]
- Ore durata intervento regolazione [h]
- Gasolio consumato $\left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]$

5.7.2 Calcoli analitici

Risulta interessante confrontare i risultati economici di un Data Center di mining che non effettua alcuna regolazione al MSD rispetto a quello che, alle medesime condizioni al contorno, lo effettua. Quest'ultimo può essere studiato sottoforma di diverse tipologie impiantistiche al fine di valutare la migliore soluzione possibile.

Nel caso in cui il DC di mining non offrisse alcun servizio di flessibilità alla rete di dispacciamento (indicato come **CASO 1**), durante una giornata lavorativa si potranno avere due condizioni operative, denominati *stati operativi*, dipendenti dal profitto (flusso di cassa) previsto per la giornata:

- a) Profitto positivo,
- b) Profitto negativo

Le espressioni (alcune già espresse nel paragrafo 5.2.2 di pagina 118) dei costi di investimento, costi fissi e variabili saranno:

Costi di investimento e costi fissi

Investimento DC

$$I_{amm,DC} [\text{€}] = \frac{\text{Costo per unità}}{\text{di potenza installata}} \left[\frac{\$}{W} \right] \cdot \frac{\text{Potenza}}{\text{effettiva installata}} [kW] \cdot \\ \cdot 1000 \left[\frac{W}{kW} \right] \cdot \frac{1}{\text{conversione} \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} [\frac{\$}{€}]} \quad (79)$$

Costo O&M

$$C_{O\&M} [\text{€}] = \frac{\text{Numero di}}{\text{tecnici}} [persone] \cdot \\ \cdot \frac{\text{Costo O&M}}{\text{pro capite annuo}} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \right] \frac{\text{Durata}}{\text{contratto}} [\text{anni}] \quad (80)$$

Costi e ricavi operativi

Profitto positivo

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = \frac{\text{Hash Rate impianto MAX} \left[\frac{\text{TH}}{\text{s}} \right]}{\text{Hash Rate rete Bitcoin}_{\text{Difficoltà}} \left[\frac{\text{TH}}{\text{s}} \right]} \cdot \\ \cdot \frac{\text{Numero blocchi}}{\text{minati}} \left[\frac{\text{blocchi}}{\text{giorno}} \right] \cdot \frac{\text{Premio per}}{\text{blocco}} \cdot \left(1 - \frac{\text{Mining pool fee} [\%]}{100} \right) \cdot \\ \cdot \left(1 - \frac{\text{Conversione} \frac{\text{BTC}}{\$} [\%]}{100} \right) \cdot \frac{1}{\text{conversione} \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} [\frac{\$}{€}]} \quad (81)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = \frac{\text{Potenza effettiva}}{\text{installata}} [kW] \cdot \frac{\text{Costo energia}}{\text{elettrica}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot \\ \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot \text{PUE} [] \quad (82)$$

Profitto negativo

Ricavi giornalieri

5. Metodologia di analisi proposta

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (83)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (84)$$

Di seguito, invece, si valuteranno i flussi economici derivanti da 6 casi operativi in cui l'impianto è stato dimensionato prevedendo la fornitura di un servizio di regolazione al MSD:

CASO 2: NO UPS, NO GE. 3 ore di regolazione

Non viene installato alcun generatore elettrico di emergenza e il Data Center dovrà fornire il servizio di regolazione per 3 ore continuative.

CASO 3: NO UPS, NO GE. 6 ore di regolazione

Non viene installato alcun generatore elettrico di emergenza e il Data Center dovrà fornire il servizio di regolazione per 6 ore continuative.

CASO 4: SI UPS per 3 ore di regolazione, NO GE

Viene installato un UPS dimensionato per fornire energia per 3 ore continuative durante la fase di regolazione. Il Gruppo Elettrogeno a diesel non viene installato.

CASO 5: SI UPS per 6 ore di regolazione, NO GE

Viene installato un UPS dimensionato per fornire energia per 6 ore continuative durante la fase di regolazione. Il Gruppo Elettrogeno a diesel non viene installato.

CASO 6: SI UPS per 15 minuti di regolazione, SI GE per 2h 45min di regolazione

Il Data Center dovrà fornire il servizio di regolazione per 3 ore continuative. Viene installato un UPS dimensionato per fornire energia per 15 minuti e un GE dimensionato per fornire energia per 2 ore e 45 minuti.

CASO 7: SI UPS per 15 minuti di regolazione, SI GE per 5h 45min di regolazione

Il Data Center dovrà fornire il servizio di regolazione per 6 ore continuative. Viene installato un UPS dimensionato per fornire energia per 15 minuti e un GE dimensionato per fornire energia per 5 ore e 45 minuti.

Per ogni singolo caso, in ogni giornata si possono verificare 6 *stati operativi*, ottenuti attraverso la combinazione tra le seguenti condizioni logiche operative:

- **REGOLAZIONE POSSIBILE (SI o NO)**

Sabato e domenica non si effettuerà alcun servizio di regolazione

- **PROFITTO NEGATIVO (SI o NO)**

Il profitto corrisponde al flusso di cassa

- **OFFERTA ACCETTATA (SI o NO)**

Si ottiene simulando i risultati del MSD (vedi paragrafo 5.4)

Le combinazioni possibili d'interesse dei precedenti stati operativi sono:

- a) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta accettata
- b) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta non accettata
- c) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta accettata

5. Metodologia di analisi proposta

- d) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta non accettata
- e) Regolazione non possibile, profitto positivo
- f) Regolazione non possibile, profitto negativo

Di seguito sono riportate le espressioni dei costi di Investimento, costi fissi e variabili per i vari stati di ogni singolo caso.

Si definiscono innanzitutto i seguenti parametri di riferimento:

$$R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = \frac{\text{Hash Rate impianto MAX} \left[\frac{\text{TH}}{\text{s}} \right]}{\text{Hash Rate rete Bitcoin} \left[\frac{\text{TH}}{\text{s}} \right] \cdot \text{Difficoltà} \left[\frac{\text{TH}}{\text{s}} \right]} \cdot \frac{\text{Numero blocchi minati} \left[\frac{\text{blocchi}}{\text{giorno}} \right]}{\text{blocchi}} \cdot \frac{\text{Premio per blocco} \left[\frac{\$}{\text{blocco}} \right]}{\text{blocco}} \cdot \left(1 - \frac{\text{Mining pool fee [%]}}{100} \right) \cdot \left(1 - \frac{\text{Conversione} \frac{\text{BTC}}{\$} \text{fee [%]}}{100} \right) \cdot \frac{1}{\text{conversione} \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} \left[\frac{\$}{\text{€}} \right]} \quad (85)$$

$$C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] = \frac{\text{Potenza effettiva installata} \left[\text{kW} \right]}{\text{potenza}} \cdot \frac{\text{Costo energia elettrica} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]}{\text{elettrica}} \cdot \text{PUE} \quad (86)$$

Si considerano ora il **CASO 2** e il **CASO 3** insieme:

Nel CASO 2 e nel CASO 3 non viene installato alcun generatore elettrico di emergenza e il Data Center dovrà fornire il servizio di regolazione rispettivamente per 3 e 6 ore continuative; i due casi si differenziano solamente per la durata del servizio di regolazione: gli stati operativi saranno i medesimi.

Ricavi fissi

Ricavi componente fissa

$$R_f \left[\text{€} \right] = \frac{\text{Componente fissa} \left[\frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{anno}} \right] \cdot \text{Potenza installata} \left[\text{kW} \right] \cdot \text{Durata contratto} \left[\text{anni} \right]}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} \quad (87)$$

Costi di investimento e costi fissi

Investimento DC

$$\begin{aligned}
 I_{amm,DC} [\text{€}] &= \\
 &= \frac{\text{Costo per unità}}{\text{di potenza installata}} \left[\frac{\$}{W} \right] \cdot \frac{\text{Potenza}}{\text{effettiva installata}} [kW] \cdot 1000 \left[\frac{W}{kW} \right] \\
 &\quad \cdot \frac{1}{\text{conversione} \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} \left[\frac{\$}{€} \right]}
 \end{aligned} \tag{88}$$

Costo di adeguamento

$$C_{ad} [\text{€}] = C_{ad,imp} [\text{€}] + C_{ad,op} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right] \cdot \frac{\text{Durata}}{\text{contratto}} [\text{anni}] \tag{89}$$

Costo O&M

$$\begin{aligned}
 C_{O\&M} [\text{€}] &= \frac{\text{Numero di}}{\text{tecnici}} [\text{persone}] \cdot \frac{\text{Costo O&M}}{\text{pro capite annuo}} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \right] \cdot \\
 &\quad \cdot \frac{\text{Durata}}{\text{contratto}} [\text{anni}]
 \end{aligned} \tag{90}$$

Costi e ricavi operativi

- a) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta accettata

Ricavi giornalieri

$$\begin{aligned}
 R_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] &= R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] \cdot \frac{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \frac{\text{Durata}}{\text{regolazione}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} + \\
 &+ \frac{\frac{\text{Durata}}{\text{regolazione}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot \frac{\text{Prezzo offerta}}{\text{accettata}} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] \cdot \frac{\text{Potenza effettiva}}{\text{installata}} [kW]}{1000 \left[\frac{kW}{MW} \right]}
 \end{aligned} \tag{91}$$

5. Metodologia di analisi proposta

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot \left(24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \underset{\text{regolazione}}{\text{Durata}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \right) \quad (92)$$

b) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta non accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] \quad (93)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \quad (94)$$

c) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] \cdot \frac{7 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \underset{\text{regolazione}}{\text{Durata}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} + \\ + \frac{\underset{\text{regolazione}}{\text{Durata}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot \underset{\text{accettata}}{\text{Prezzo offerta}} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] \cdot \underset{\text{installata}}{\text{Potenza effettiva}} [\text{kW}]}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} \quad (95)$$

Nella (95) le 7 [h/giorno] corrispondono alla somma di 6 [h/giorno] in cui il datore garantisce la disponibilità alla fornitura delle ore stabilite con TERNA e di 1 [h/giorno] di accensione anticipata del Data Center.

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot \left(7 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \underset{\text{regolazione}}{\text{Durata}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \right) \quad (96)$$

d) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta non accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \quad (97)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 7 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (98)$$

e) Regolazione non possibile, profitto positivo

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \quad (99)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (100)$$

Soluzioni uguali allo stato b)

f) Regolazione non possibile, profitto negativo

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (101)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (102)$$

5. Metodologia di analisi proposta

Si considerano ora il **CASO 4** e il **CASO 5** insieme:

Nel caso 4 e nel caso 5 viene installato l'UPS come generatore elettrico di emergenza, dimensionato per fornire energia al Data Center durante tutto il servizio di regolazione, rispettivamente di 3 e 6 ore di durata, e l'energia durante le eventuali brevi interruzioni di alimentazione della rete elettrica: gli stati operativi saranno i medesimi.

Si trascura il caso di interruzione di alimentazione dalla rete elettrica entro il periodo di possibile regolazione o entro il quarto d'ora precedente ma non durante l'effettivo servizio, nel quale il Data Center si trova già in una condizione di non prelievo; se non si fosse trascurato si sarebbe dovuto dimensionare l'UPS in modo tale da fornire 15 minuti (o più, a discrezione del titolare) supplementari.

Si ricordano le seguenti formule:

$$Q_{UPS,min}[kWh] = \frac{\dot{Q}_{DC} [kW] * PUE * t_{reg}[h]}{\eta_s[]} \quad (103)$$

$$Q_{UPS,MAX}[kWh] = \frac{Q_{UPS,min}[kWh]}{(1 - P_{ciclo} [\frac{\%}{anno}])} \quad (104)$$

Ricavi fissi

Ricavi componente fissa

$$R_f [\text{€}] = \frac{\text{Componente fissa} \left[\frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{anno}} \right] \cdot \text{Potenza installata} [\text{kW}] \cdot \text{Durata contratto [anni]}}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} \quad (105)$$

Costi di investimento e costi fissi

Investimento DC

$$I_{amm,DC} [\text{€}] = \frac{\text{Costo per unità di potenza installata } \left[\frac{\text{€}}{W} \right] \cdot \text{Potenza effettiva installata } [kW] \cdot 1000 \left[\frac{W}{kW} \right]}{\cdot \frac{1}{\text{conversione } \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} \left[\frac{\text{€}}{\text{€}} \right]}} \quad (106)$$

Investimento UPS

$$I_{amm,UPS} [\text{€}] = \frac{\text{Costo di installazione,UPS } \left[\frac{\text{€}}{kWh} \right] \cdot \frac{Q_{UPS,min}[kWh]}{(1-P_{ciclo} \left[\frac{\%}{anno} \right])} \cdot \frac{\text{Durata contratto}[anni]}{\text{Vita utile UPS}[anni]}} \quad (107)$$

Costo di adeguamento UPS

$$C_{ad,UPS} [\text{€}] = C_{ad,imp,UPS} [\text{€}] + C_{ad,op,UPS} \left[\frac{\text{€}}{anno} \right] \cdot \frac{\text{Durata contratto}}{\text{contratto}} [anni] \quad (108)$$

Costo O&M

$$C_{O\&M} [\text{€}] = \frac{\text{Numero di tecnici}}{\text{persone}} \cdot \frac{\text{Costo O&M pro capite annuo}}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \right] \cdot \frac{\text{Durata contratto}}{\text{contratto}} [anni] \quad (109)$$

Costi e ricavi operativi

- a) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] + \frac{+ \frac{\text{Durata regolazione}}{\text{giorno}} \cdot \frac{h}{giorno} \cdot \frac{\text{Prezzo offerta}}{\text{accettata}} \left[\frac{\text{€}}{MW h} \right] \cdot \frac{\text{Potenza effettiva}}{\text{installata}} [kW]}{1000 \left[\frac{kW}{MW} \right]} \quad (110)$$

5. Metodologia di analisi proposta

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot \left(24 \left[\frac{h}{giorno} \right] - \underset{regolazione}{\text{Durata}} \left[\frac{h}{giorno} \right] \right) \quad (111)$$

L'energia fornita dall'UPS durante la durata di regolazione non viene pagata (almeno non direttamente)

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS} (t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{\text{Costo di}} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX} [kWh] \cdot \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \quad (112)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{ciclo} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

Costo di rete UPS

$$C_{rete,UPS} (t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{el} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot \frac{Q_{UPS,min}(t) \left[\frac{kWh}{giorno} \right]}{\eta_c} \quad (113)$$

dove t è il momento in cui l'accumulatore effettua la ricarica
dalla rete

- b) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta non accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \quad (114)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (115)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \quad (116)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

c) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \cdot \frac{7 \left[\frac{h}{giorno} \right]}{24 \left[\frac{h}{giorno} \right]} + \frac{+ \frac{Durata regolazione \left[\frac{h}{giorno} \right] \cdot Prezzo offerta accettata \left[\frac{\epsilon}{MW h} \right] \cdot Potenza effettiva installata [kW]}{1000 \left[\frac{kW}{MW} \right]}}{(117)}$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 1 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (118)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \quad (119)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{ciclo} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

Costo di rete UPS

$$C_{rete,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{el} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot \frac{Q_{UPS,min}(t) \left[\frac{kWh}{giorno} \right]}{\eta_c} \quad (120)$$

5. Metodologia di analisi proposta

d) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta non accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \cdot \frac{7 \left[\frac{h}{giorno} \right]}{24 \left[\frac{h}{giorno} \right]} \quad (121)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 7 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (122)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS} (t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX} [kWh] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \quad (123)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

e) Regolazione non possibile, profitto positivo

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \quad (124)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (125)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS} (t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX} [kWh] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \quad (126)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

Soluzioni uguali allo stato b)

- f) Regolazione non possibile, profitto negativo

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (127)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (128)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \quad (129)$$

$$\frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100}$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

Si considerano ora il **CASO 6** e il **CASO 7** insieme:

Nel CASO 6 e nel CASO 7 viene installato l'UPS come generatore elettrico di emergenza che, durante il servizio di regolazione, ha l'obiettivo di fornire al Data Center l'energia elettrica richiesta durante una breve interruzione di corrente della rete o per il tempo necessario all'azionamento del GE, entrambi comunque ipotizzati della durata di 15 minuti; l'azionamento del GE porterà poi alla fornitura dell'energia richiesta restante. Gli stati operativi dei due casi saranno i medesimi.

5. Metodologia di analisi proposta

Ricavi fissi

Ricavi componente fissa

$$R_f \text{ [€]} = \frac{\text{Componente fissa} \left[\frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{anno}} \right] \cdot \text{Potenza installata} \text{ [kW]} \cdot \text{Durata contratto} \text{ [anni]}}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} \quad (130)$$

Costi di investimento e costi fissi

Investimento DC

$$I_{amm,DC} \text{ [€]} = \frac{\text{Costo per unità di potenza installata} \left[\frac{\$}{W} \right] \cdot \text{Potenza effettiva installata} \text{ [kW]} \cdot 1000 \left[\frac{W}{kW} \right]}{\cdot \frac{1}{\text{conversione} \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} \left[\frac{\$}{€} \right]}} \quad (131)$$

Investimento UPS

$$I_{amm,UPS} \text{ [€]} = \frac{\text{Costo di installazione,UPS} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot \frac{Q_{UPS,min} \text{ [kWh]}}{\left(1 - P_{ciclo} \left[\frac{\%}{\text{anno}} \right] \right)} \cdot \frac{\text{Durata contratto} \text{ [anni]}}{\text{Vita utile UPS} \text{ [anni]}}}{\cdot \frac{1}{\text{conversione} \frac{\text{Euro}}{\text{Dollaro}} \left[\frac{\$}{€} \right]}} \quad (132)$$

Investimento GE

$$I_{amm,GE} \text{ [€]} = n_{u,GE} \text{ [unità]} \cdot \dot{Q}_{el,u,GE} \left[\frac{\text{kW}}{\text{unità}} \right] \cdot C_{GE} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right] \cdot \frac{\text{Durata contratto} \text{ [anni]}}{\frac{\text{Vita utile}}{GE} \text{ [anni]}} \quad (133)$$

Costo di adeguamento UPS + GE

$$C_{ad,UPS} \text{ [€]} = C_{ad,imp,UPS+GE} \text{ [€]} + C_{ad,op,UPS+GE} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right] \cdot \frac{\text{Durata contratto} \text{ [anni]}}{\text{contratto} \text{ [anni]}} \quad (134)$$

Costo O&M

$$C_{O\&M} [\text{€}] = \underset{\text{tecnici}}{\text{Numero di}} \ [persone] \cdot \underset{\text{pro capite annuo}}{\text{Costo O&M}} \left[\frac{\text{€}}{\text{anno} \cdot \text{persona}} \right] \cdot \underset{\text{contratto}}{\text{Durata}} \ [anni] \quad (135)$$

Costi e ricavi operativi

- a) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] + \frac{+ \frac{\text{Durata regolazione}}{\text{giorno}} \cdot \frac{\text{Prezzo offerta accettata}}{\text{MWh}} \cdot \frac{\text{Potenza effettiva installata}}{\text{kW}}}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} \quad (136)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot \left(24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \frac{\text{Durata regolazione}}{\text{giorno}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \right) \quad (137)$$

L'energia fornita dall'UPS durante la durata di regolazione non viene pagata

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = \underset{\text{installazione,UPS}}{\text{Costo di}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot Q_{UPS,MAX} [\text{kWh}] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{\text{giorno}} \right]}{100} \quad (138)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{\text{giorno}} \right] = P_{ciclo} \left[\frac{\%}{\text{giorno}} \right]$

Costo di rete UPS

$$C_{rete,UPS} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = C_{el} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot \frac{Q_{UPS,min}(t) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{giorno}} \right]}{\eta_c} \quad (139)$$

5. Metodologia di analisi proposta

Costo gasolio GE

$$C_{fuel}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = P_{fuel} \left[\frac{\epsilon}{L} \right] \cdot c_g \left[\frac{L}{h} \right] \cdot t_{reg,GE} \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (140)$$

b) Regolazione possibile, profitto positivo, offerta non accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \quad (141)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (142)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$\frac{C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right]}{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]} = \underset{installazione,UPS}{Costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \frac{100}{100}$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$ (143)

c) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \cdot \frac{7 \left[\frac{h}{giorno} \right]}{24 \left[\frac{h}{giorno} \right]} +$$

$$+ \frac{Durata \left[\frac{h}{giorno} \right] \cdot Prezzo offerta \left[\frac{\epsilon}{MWh} \right] \cdot Potenza effettiva \left[kW \right]}{1000 \left[\frac{kW}{MW} \right]} \quad (144)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 1 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (145)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$\begin{aligned} C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] &= \underset{installazione,UPS}{costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \\ &\frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \\ \text{dove } P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] &= P_{ciclo} \left[\frac{\%}{giorno} \right] \end{aligned} \quad (146)$$

Costo di rete UPS

$$C_{rete,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{el} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot \frac{Q_{UPS,min}(t) \left[\frac{kWh}{giorno} \right]}{\eta_c} \quad (147)$$

Costo gasolio GE

$$C_{fuel}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = P_{fuel} \left[\frac{\epsilon}{L} \right] \cdot C_g \left[\frac{L}{h} \right] \cdot t_{reg,GE} \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (148)$$

d) Regolazione possibile, profitto negativo, offerta non accettata

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \cdot \frac{7 \left[\frac{h}{giorno} \right]}{24 \left[\frac{h}{giorno} \right]} \quad (149)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 7 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (150)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{Costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \quad (151)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

e) Regolazione non possibile, profitto positivo

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] \quad (152)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{giorno} \right] \quad (153)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{Costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100} \quad (154)$$

dove $P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$

Soluzioni uguali allo stato b)

f) Regolazione non possibile, profitto negativo

Ricavi giornalieri

$$R_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (155)$$

Costi giornalieri

$$C_g \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (156)$$

Costo perdita di capacità UPS

$$C_{loss,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = \underset{installazione,UPS}{costo di} \left[\frac{\epsilon}{kWh} \right] \cdot Q_{UPS,MAX}[kWh] \cdot \quad (157)$$

$$\frac{P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right]}{100}$$

$$\text{dove } P_{UPS} \left[\frac{\%}{giorno} \right] = P_{s-d} \left[\frac{\%}{giorno} \right]$$

5.7.3 Calcolo Offerta minima al MSD

Il calcolo del minimo valore di offerta da presentare al MSD viene ottenuta a partire dalla seguente equazione:

$$\Delta \text{Profitto} (D - 1) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0 \quad (158)$$

dove $\Delta \text{Profitto} (D - 1)$ è il mancato ricavo avuto durante il servizio di regolazione, nel giorno precedente a quello cui si riferisce l'offerta.

Esplicitando il primo membro della (158) si ottiene:

$$\begin{aligned} \Delta \text{Profitto} (D - 1) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] &= \\ &= \text{Profitto} (D - 1) - \text{Profitto}_{Reg}(D - 1) = \\ &= \text{Ricavi} (D - 1) - \text{Costi} (D - 1) - (\text{Ricavi}_{Reg}(D - 1) - \\ &\quad \text{Costi}_{Reg}(D - 1)) = \\ &= \text{Ricavi} - \text{Costi} - (\text{Ricavi}_{Reg} - \text{Costi}_{Reg}) \end{aligned} \quad (159)$$

5. Metodologia di analisi proposta

dove il pedice *reg* indica che quel particolare parametro è stato ottenuto in condizione di regolazione.

Siccome l'offerta, in fase ex-ante del MSD, viene fatta il giorno precedente (giorno D-1) a quello di effettiva attivazione del servizio di regolazione a cui si riferisce (giorno D), i valori che costituiscono il parametro *Profitto* ($D - 1$) sono quelli del giorno D-1, riferiti allo stato di “regolazione possibile”.

Se nel giorno D non fosse possibile effettuare il servizio regolazione (sabato e domenica) allora non avrebbe senso calcolare il valore di offerta minima nel giorno D-1.

Se nel giorno D fosse invece possibile effettuare la regolazione (da lunedì a venerdì), il valore di offerta minima dipenderà dalla condizione di profitabilità del giorno D-1:

- se il Profitto di (D-1) fosse positivo, i termini di "*Ricavi*" e "*Costi*" della (159) assumerebbero quelli espressi tramite lo stato **b** (regolazione possibile, profitto positivo, offerta non accettata) mentre i termini "*Ricavi_{Reg}*" e "*Costi_{Reg}*" assumerebbero quelli espressi dallo stato **a** (regolazione possibile, profitto positivo, offerta accettata);
- se il Profitto di (D-1) fosse negativo, non essendo certi del valore che potrebbe assumere il profitto il giorno successivo, si presuppone che anche il giorno D avrebbe un profitto negativo; siccome in tali condizioni di funzionamento le macchine sarebbero spente per la maggior parte del tempo ad eccezione delle 6 ore in cui si deve garantire la possibilità di fornitura del servizio e dell'ora precedente a tale intervallo (ipotesi), per tornare parzialmente di queste perdite si dovrà presentare un'offerta con un prezzo basso, tale da essere facilmente accettato. Verrà utilizzato come prezzo di riferimento per le offerte di vendita in questa condizione di funzionamento il valore di *offerta minima limite*, che verrà calcolato nel prossimo capitolo.

Qualora il Profitto di (D-1) fosse positivo ma il corrispondente valore di *offerta minima* risultasse inferiore al valore di *offerta minima limite*, non sarebbe economicamente conveniente abbassare un'offerta che verrebbe statisticamente già accettata. In questo caso il valore di *offerta minima* assume lo stesso valore di *offerta minima limite*.

Il generale minor profitto dovuto alla cessata attività industriale nell'intervallo di tempo in cui il DC fornisce il servizio di regolazione deve essere ripagato per intero dai ricavi ottenuti dall'energia venduta al MSD.

Si studia ora l'andamento dell'offerta minima per i diversi casi di regolazione, ipotizzando che il profitto al giorno D – 1 risultasse positivo:

Caso 2 – 3

Sostituendo nella (159) le espressioni dei ricavi e costi operativi delle (91) (92) (93) (94) si ottiene la seguente equazione:

$$\begin{aligned}
 & R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] - C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \\
 & R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] \cdot \frac{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \underset{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]}{\text{Durata regolazione} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} - }{ \\
 & + \frac{\text{Durata regolazione} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot \text{Prezzo offerta accettata} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] \cdot \text{Potenza effettiva installata} [\text{kW}]}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} + \\
 & C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot \left(24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - \underset{\text{Durata regolazione}}{\left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} \right) = 0
 \end{aligned} \tag{160}$$

Considerando il prezzo dell'offerta accettata pari al prezzo di offerta minima, saltando alcuni passaggi matematici, la (160) si può riscrivere come:

$$\begin{aligned}
 & \underset{\text{minima MSD}}{\text{Offerta}} (D) \left[\frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}} \right] \cdot \underset{\text{regolazione}}{\text{Durata}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot \frac{\text{Potenza effettiva installata} [\text{kW}]}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} = \\
 & \underset{\text{regolazione}}{\text{Durata}} \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot \left(\frac{R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} - C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \right)
 \end{aligned} \tag{161}$$

Dalla (161) si può notare come i due termini di “*Durata regolazione*” si possano elidere tra di loro: la minima offerta non dipenderà quindi dalla sua durata (si ricorda che diversi dati storici erano stati ipotizzati avere un andamento costante nell'arco della giornata, a causa della mancanza di dati con riferimenti temporali minori). L'equazione finale che la descrive sarà la seguente:

5. Metodologia di analisi proposta

$$\frac{\text{Offerta minima MSD}}{\text{MW} \cdot \text{h}} (D) \left[\frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}} \right] = \left(\frac{R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} - C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \right) \cdot \frac{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]}{\frac{\text{Potenza effettiva installata}}{\text{kW}}} \quad (162)$$

Caso 4 – 5

Eseguendo lo stesso percorso anche per i casi 4-5 si ottiene la seguente equazione di partenza:

$$\begin{aligned} R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] - C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - C_{loss,UPS,b} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] - \\ R_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] - \frac{Durata regolazione \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \cdot Prezzo offerta accettata \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] \cdot Potenza effettiva installata [\text{kW}]}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} + \\ C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot \left(24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] - Durata regolazione \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right] \right) + \\ C_{loss,UPS,a} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] + C_{rete,UPS} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] = 0 \end{aligned} \quad (163)$$

Dove i pedici “a” o “b” indicano che il parametro assume un valore diverso a seconda che ci si trovi nello stato “a” o “b”; ad esempio, per il termine $C_{loss,UPS}$ il pedice “a” indica che il valore della P_{UPS} utilizzata è pari alla P_{ciclo} , mentre il pedice “b” indica che è pari a P_{s-d} .

Considerando il prezzo di offerta accettata pari al prezzo di offerta minima e saltando alcuni passaggi matematici, la (163) si può riscrivere come:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Offerta minima MSD}}{\text{MW} \cdot \text{h}} (D) \left[\frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}} \right] \cdot \frac{Durata regolazione \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} \cdot \frac{Potenza effettiva installata [\text{kW}]}{1000 \left[\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right]} = \\ -C_{loss,UPS,b} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] - C_{rif} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{Durata regolazione \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{giorno}} \right]} + \\ C_{loss,UPS,a} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] + C_{rete,UPS} (t) \left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right] \end{aligned} \quad (164)$$

In questo caso non è invece possibile elidere il termine di “Durata regolazione” e l’equazione che descrive il valore dell’offerta minima assumerà la seguente espressione:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\text{Offerta minima MSD}(\mathbf{D}) \left[\frac{\epsilon}{MW \cdot h} \right]}{= (165)} \\
 & \left(\frac{C_{rete,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] + C_{loss,UPS,a}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] - C_{loss,UPS,b}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right]}{Durata regolazione \left[\frac{h}{giorno} \right]} - \right. \\
 & \left. C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \right) \cdot \frac{1000 \left[\frac{kW}{MW} \right]}{Potenza effettiva installata \left[kW \right]}
 \end{aligned}$$

Caso 6 – 7

Eseguendo lo stesso percorso anche per i casi 6-7 si ottiene la seguente equazione di partenza:

$$\begin{aligned}
 & R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] - C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{giorno} \right] - C_{loss,UPS,b}(t) - R_{rif} \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] + (166) \\
 & - \frac{Durata regolazione \left[\frac{h}{giorno} \right] \cdot Prezzo offerta accettata \left[\frac{\epsilon}{MWh} \right] \cdot Potenza effettiva installata \left[kW \right]}{1000 \left[\frac{kW}{MW} \right]} \\
 & + C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \cdot \left(24 \left[\frac{h}{giorno} \right] - Durata regolazione \left[\frac{h}{giorno} \right] \right) + C_{loss,UPS,a}(t) + C_{rete,UPS} + \\
 & + C_{fuel}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] = 0
 \end{aligned}$$

La (166) è praticamente identica alla (163), con l'aggiunta però del termine di costo legato al consumo di combustibile liquido da parte del GE. Considerando il prezzo di offerta accettata pari al prezzo di offerta minima è possibile quindi scrivere subito l'equazione che descrive la variazione del prezzo di offerta minima:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\text{Offerta minima MSD}(\mathbf{D}) \left[\frac{\epsilon}{MW \cdot h} \right]}{=} (167) \\
 & \left(\frac{C_{rete,UPS}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] + C_{loss,UPS,a}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] + C_{fuel}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right] - C_{loss,UPS,b}(t) \left[\frac{\epsilon}{giorno} \right]}{Durata regolazione \left[\frac{h}{giorno} \right]} - \right. \\
 & \left. C_{rif} \left[\frac{\epsilon}{h} \right] \right) \cdot \frac{1000 \left[\frac{kW}{MW} \right]}{Potenza effettiva installata \left[kW \right]}
 \end{aligned}$$

5. Metodologia di analisi proposta

Rispetto alla (165) il termine del costo del combustibile porta il prezzo dell'offerta minima ad un valore più elevato: maggiori costi operativi legati ai gruppi elettrogeni devono essere ripagati con un prezzo più alto di remunerazione del servizio fornito.

6 Risultati e analisi

6.1 Offerta minima limite

È stato detto che quando il profitto temporaneo del Data Center di mining è negativo, non risulta conveniente tenere accese le macchine; qualora il DC abbia sottoscritto un contratto con il gestore di rete per la fornitura del servizio di flessibilità alla rete di trasmissione, negli orari di possibile richiesta di intervento, dovrà mantenere il proprio impianto operativo anche se economicamente non conveniente. L'offerta presentata dovrà quindi essere tale da minimizzare le perdite avute; alle condizioni in cui tenere acceso il proprio impianto comporta più costi che ricavi, però, qualsiasi offerta superiore a 0 renderebbe conveniente il servizio fornito. Si vuole quindi calcolare quel determinato valore di offerta che:

1. abbia il valore più alto possibile;
2. venga statisticamente accettata.

Questo valore di offerta verrà chiamata “**offerta minima limite**” e sarà quella che porterà il maggiore NCF a fine contratto.

A volte succede che il valore di *offerta minima* fatta in condizioni di bassi valori di profitto positivo, risulti essere davvero esigua; al fine di seguire la logica di massimizzazione del profitto, quindi, si impone che il valore di offerta minima non scenda sotto il valore di offerta minima limite.

In Tabella 6.1 sono riportati i valori di *offerta minima limite* ottenuti per tutte le combinazioni possibili delle variabili arbitrarie considerate all'interno dello scenario 3: durata contratto (0,5 – 1 anni), prezzo energia elettrica (0,10 – 0,15 €/kWh), fase (accumulativa, distributiva, trend), casi con regolazione (2,3,4,5,6,7).

6. Risultati e analisi

Durata contratto [anni]	Prezzo [€/kWh]	Fase	Caso					
			2	3	4	5	6	7
0,5	0,1	ACCUMULATIVA	85	85	<75	<140	>145	>95
		DISTRIBUTIVA	75	75	<25	>125	>105	>100
		TREND	95	95	80	>125	indiff	indiff
	0,15	ACCUMULATIVA	80	80	<65	>240	80	235
		DISTRIBUTIVA	65	65	<25	>125	70	>125
		TREND	75	75	45-65	>140	120	>125
1	0,1	ACCUMULATIVA	80	80	<40	>145	125	>145
		DISTRIBUTIVA	75	75	<25	>160	>110	>110
		TREND						
	0,15	ACCUMULATIVA	75	75	<40	>240	80	235
		DISTRIBUTIVA	70	70	<25	>160	75	>160
		TREND						

Tabella 6.1: Offerta minima limite per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3

I valori di *Trend* per il contratto di 1 anno non sono stati calcolati perché al momento della scrittura di questo elaborato, essendo passati 8 mesi dal breakout che ha dato inizio alla fase di trend dello scenario 3, non si avevano ancora a disposizione dati sufficienti. La voce “indiff” che si trova nella tabella indica che la variazione dell’offerta minima limite non ha alcun effetto sul NCF.

Analizzando i risultati si può notare che i casi 2-3 presentano gli stessi valori di *offerta minima limite*, compresi nella fascia 65-95 [€/MWh] con una media di circa 75 [€/MWh]. Gli altri casi, invece, non presentano dei valori ben definiti: prendendo ad esempio il caso 4 della fase distribuita (vedi Figura 6.1), il NCF assume il valore massimo per le offerte minime limite inferiori a 25 [€/MWh]: si ha che al diminuire del numero di offerte accettate, si riduce il NCF di fine contratto. Opposta è la situazione per i casi 5 e 7 nei quali il NCF aumenta al ridursi del numero di offerte accettate: non risulterà conveniente fornire il servizio di regolazione per 6 ore continuative e l’offerta fatta al MSD dovrà quindi essere molto elevata. Il caso 6 risulta invece avere comportamenti ibridi.

Una non adeguata impostazione dell’offerta minima limite può portare a riduzioni del NCF di fine contratto rispetto alla condizione ottimale fino al 10-12 %.

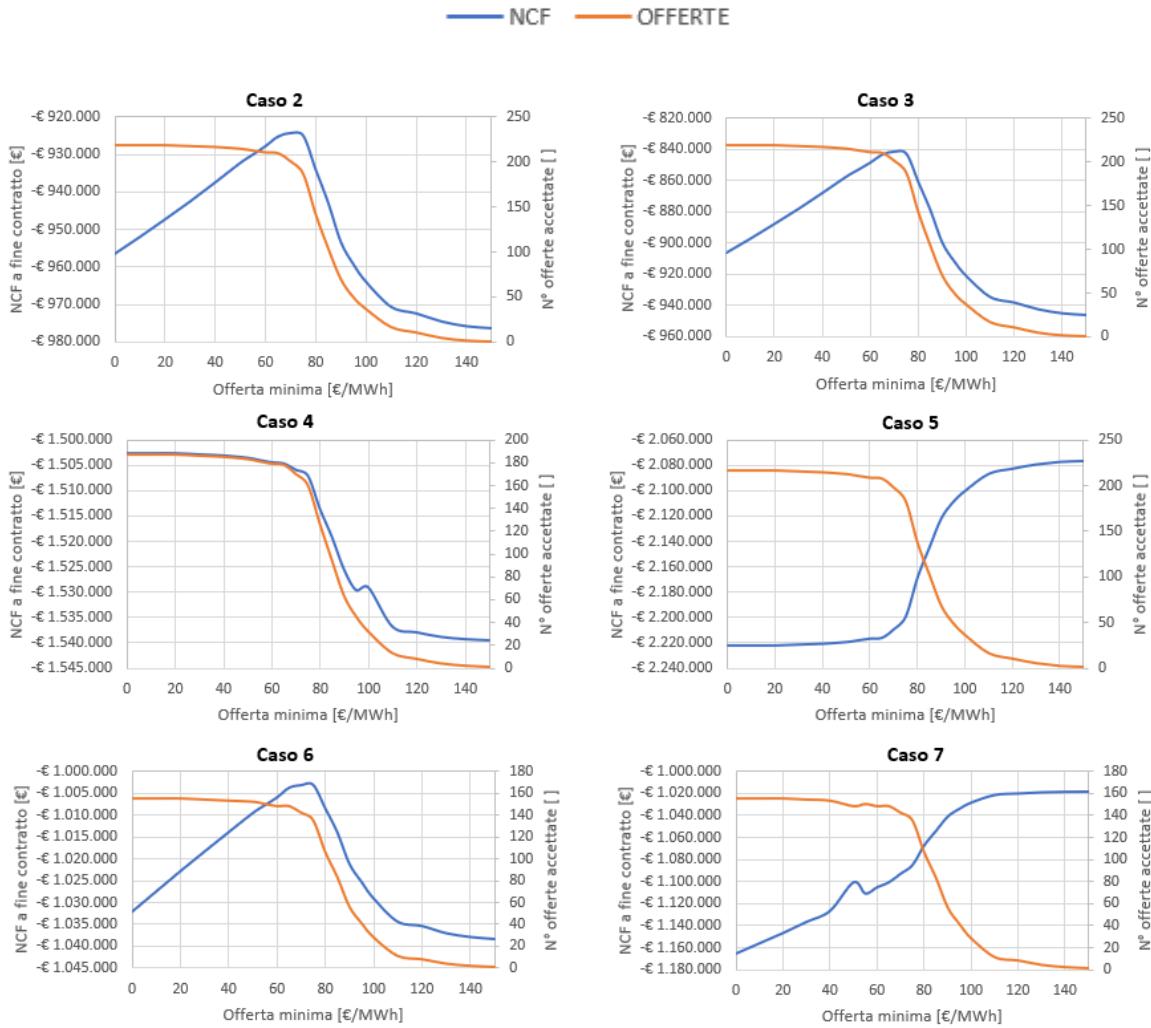


Figura 6.1: NCF a fine contratto e n° offerte accettate al variare dell'offerta minima limite in condizioni di fase distributiva, costo en. el. 0,15 €/kWh e 1 anno di contratto nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3

6. Risultati e analisi

Per lo scenario 2, invece, si ottengono i risultati riportati in Tabella 6.2:

Durata contratto [anni]	Prezzo [€/kWh]	Fase	Caso					
			2	3	4	5	6	7
0,5	0,1	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	70	70	>140	>140	>140	>140
		TREND	70	70	80	>230	80	>90
	0,15	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	65	65	<50	>140	70	>140
		TREND	70	70	<50	>230	65	175
1	0,1	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	75	75	>160	>160	150	295
		TREND	65	65	<50	>230	120	195
	0,15	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	70	70	<45	>160	70	295
		TREND	55	55	<50	>230	55	170

Tabella 6.2: Offerta minima limite per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 2

I valori della fase accumulativa non sono stati considerati perché, a monte, i risultati economici ottenuti per questa fase sono stati fin troppo vantaggiosi (si parla di un NCF di 20 M€...); evidentemente il modello applicato, con i parametri tecnici che seguono lo sviluppo storico degli Asic di bitcoin, non è stato coerente con l'effettivo contesto creatosi all'interno della fase stessa. Una possibile spiegazione è che i primi Asic hanno iniziato a diffondersi a metà del 2013 ma per arrivare ad una loro applicazione industriale di massa sono dovuti passare diversi mesi, a causa delle tempistiche legate all'organizzazione, produzione, logistica da parte delle aziende produttrici di questa nuova tecnologia. Essendo la fase accumulativa a cavallo di questo periodo, il modello utilizzato è risultato poco veritiero, soprattutto nei suoi primi mesi.

Nella Tabella 6.2 si può osservare che il comportamento del valore di *offerta minima limite* assume le stesse dinamiche di quelle dello scenario 3; da notare, però, che per i casi 2-3 il range è compreso tra 55 e 70, inferiore rispetto a quello delineato nello scenario 3. Evidentemente negli ultimi anni, forse complice proprio la ricerca di nuove risorse da

utilizzare a supporto della rete del dispacciamento, sono aumentati i valori medi di accettazione delle offerte.

6.2 Incremento rispetto offerta minima

Una volta ottenuti i valori di *offerta minima limite* sarà possibile calcolare un secondo parametro legato all'offerta: l'incremento rispetto il valore di offerta minima. L'offerta minima è infatti quel valore che, se accettata dal gestore di rete, non implica alcun differenziale economico a livello di costi e ricavi operativi tra la condizione di regolazione e quella di non regolazione. Per avere un margine di profitto, quindi, bisognerà incrementare tale offerta. Considerando i valori di *offerta minima limite* di Tabella 6.1, i valori incrementalini dell'offerta minima (si parla di *offerta minima incrementata*) che porteranno il migliore NCF al termine del contratto per lo scenario 3 saranno quelli riportati in Tabella 6.3.

Durata contratto [anni]	Prezzo [€/kWh]	Fase	Caso					
			2	3	4	5	6	7
0,5	0,1	ACCUMULATIVA	20	20	145	140	>35	>30
		DISTRIBUTIVA	30	30	>30	>20	indiff	Indiff
		TREND	5	5	>50	>40	indiff	Indiff
	0,15	ACCUMULATIVA	30	30	>75	>65	indiff	<80
		DISTRIBUTIVA	15	15	Indiff	indiff	indiff	Indiff
		TREND	10	10	>35	>15	indiff	Indiff
1	0,1	ACCUMULATIVA	20	20	>145	>135	30	Indiff
		DISTRIBUTIVA	15	15	>50	>40	indiff	Indiff
		TREND						
	0,15	ACCUMULATIVA	30	30	>75	>65	85	<80
		DISTRIBUTIVA	10	10	>35	>15	indiff	Indiff
		TREND						

Tabella 6.3: Incremento sull'offerta minima per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3

6. Risultati e analisi

Dalla Tabella 6.3 si può notare che per i casi 2-3 i valori di incremento rispetto all'offerta minima sono compresi tra 5 e 30 [€/MWh]; superato un certo valore di incremento (vedi Figura 6.2), però, il NCF tende a ridursi in maniera più pronunciata. Per i casi 4-5, i valori incrementalì devono essere superiori ad un determinato limite, corrispondente al numero più basso di offerte accettate, per trarne i migliori benefici economici; nella fase accumulativa si può osservare che questo valore limite assuma valori più elevati. Per i casi 6-7, generalmente, la variazione dell'incremento di offerta minima tende a non avere influenza sul NCF di fine contratto. Da considerare, comunque, che in generale tali variazioni, una volta stabilita l'offerta minima limite, sono piuttosto basse, inferiori all'1-2% per i casi 2-3 ed inferiori allo 0,2% per i casi 4-5.

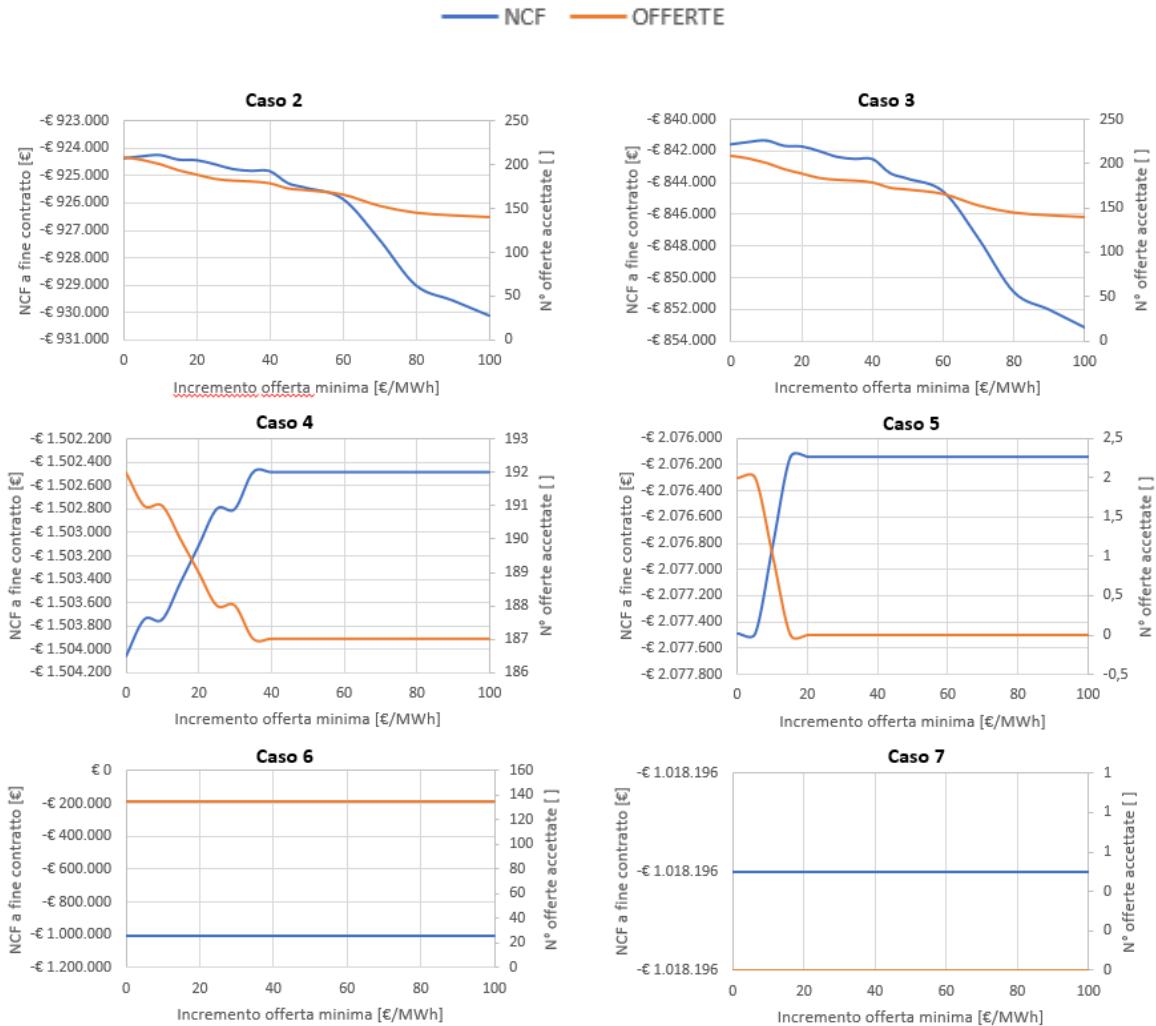


Figura 6.2: NCF a fine contratto e n° offerte accettate al variare dell'incremento di offerta minima in condizioni di fase distributiva, costo en. el. 0,15 €/kWh e 1 anno di contratto nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 3

Per lo scenario 2, invece, i valori incrementalini sull'offerta minima, tali da ottenere il miglior NCF a termine del contratto, sono quelli riportati in Tabella 6.4. Rispetto allo scenario 3, nei casi 2-3 essi hanno un range un po' più ampio (0-50 €/MWh). Per i casi 4-5 tendono sempre ad avere un limite inferiore, con dei valori però mediamente più alti. I casi 6-7 tendono ad

6. Risultati e analisi

essere più influenzabili dalla variazione di valore incrementale e spesso a presentare un suo valore ottimale.

Durata contratto [anni]	Prezzo [€/kWh]	Fase	Caso					
			2	3	4	5	6	7
0,5	0,1	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	15	15	>40	>25	indiff	indiff
		TREND	25	25	>140	>80	70	65
	0,15	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	0	0	>5	indiff	indiff	indiff
		TREND	25	25	35-65	>25	70	<65
1	0,1	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	15	15	>235	>225	90	<85
		TREND	25	25	>140	>80	70	65
	0,15	ACCUMULATIVA						
		DISTRIBUTIVA	50	50	>220	>215	145	145
		TREND	35	35	35-55	>50	35	65

Tabella 6.4: Incremento sull'offerta minima per varie fasi, durata contratto e costo en el. nei diversi casi di regolazione per lo Scenario 2

6.3 Caso studio

Si stabilisce che il caso 1, ossia quello di configurazione standard del Data Center di mining, sia quello di riferimento con il quale fare il confronto nella verifica della convenienza del servizio di flessibilità. Esso verrà messo in discussione confrontando i suoi risultati economici con quelli di un analogo Data Center che svolge però un servizio di regolazione (caso 2-3), con l'eventuale supporto di un sistema di accumulo (caso 4-5) e di un gruppo elettrogeno diesel (caso 6-7).

Si definisce **caso studio** quello che possiede i seguenti due parametri:

- Costo corrente elettrica: 0,15 [€/kWh]
- Durata contratto: 1 [anno]

Il costo di corrente è quello che effettivamente avrebbe attualmente un DC di 1 [MW] di potenza installata, funzionante 24h. La durata del contratto è stata invece stabilita pari a 1 [anno] perché ci si aspetta che questo valore possa corrispondere a quello inizialmente utilizzato in un ipotetico futuro scenario.

Si vuole valutare l'andamento nel tempo del NCF (Net Cash Flow) tra le diverse fasi del ciclo di mercato di bitcoin per ogni caso considerato.

Si analizza inizialmente la condizione A, quella in cui un Data Center di 1 [MW] di potenza installata inizi l'attività di mining nel primo giorno della *fase accumulativa* dello scenario 3 (2017-19), assumendo un costo di energia elettrica di 0,15 [€/kWh] e una durata del contratto di 1 anno. Il grafico del NCF ottenuto lungo il periodo ad esso associato viene riportato in Figura 6.3.

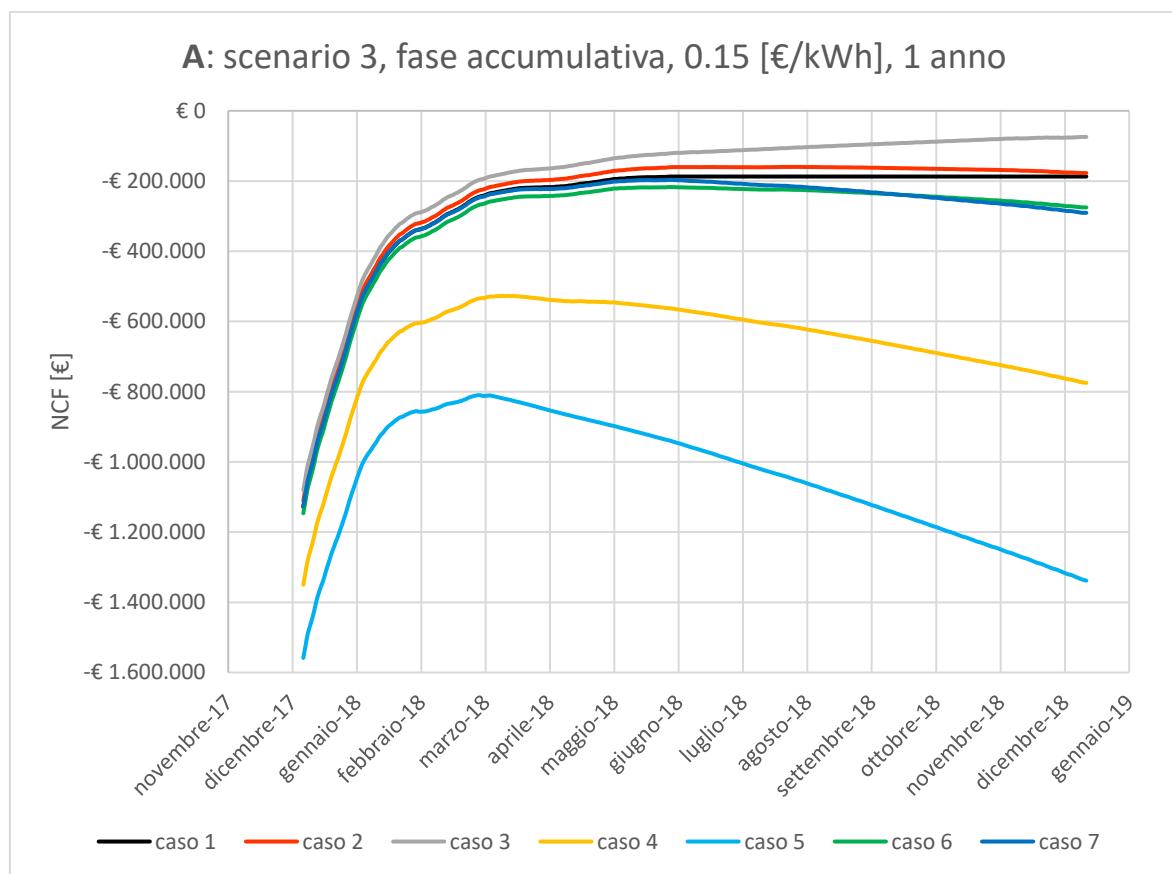


Figura 6.3: NCF per condizione A

6. Risultati e analisi

La prima cosa che si nota osservando il grafico di Figura 6.3 è che i casi 4 e 5, ossia quelli in cui il DC viene alimentato da accumulatori per tutta la durata dell'intervento di regolazione, non sono convenienti rispetto agli altri casi: non solo i maggiori costi di investimento dei sistemi di accumulo li portano in una posizione iniziale di svantaggio, ma i costi operativi (costi di ricarica batteria, perdita di capacità permanente) sono tali che una graduale riduzione dei ricavi, a seguito dell'incremento dell'Hash rate della rete globale di Bitcoin e del ridursi del prezzo di bitcoin, li conduce in non molto tempo verso un cash flow negativo. Tra i due, il caso 5, ossia quello nel quale viene dimensionato un accumulatore in grado di fornire energia elettrica per 6 ore continuative, è quello che subisce maggiori perdite.

I casi 6-7, ossia quelli in cui il DC, durante l'intervento di regolazione, continua ad essere alimentato per i primi 15 minuti dall'UPS (accumulatore) e per il successivo tempo dal gruppo elettrogeno a diesel, presentano un profilo di NCF molto simile anche se meno conveniente rispetto al caso di riferimento (caso 1).

I casi 2-3, nei quali il Data Center non è supportato da alcun sistema di alimentazione di emergenza, sono quelli che, al contrario degli altri, consentono di avere un NCF al termine del contratto superiore a quello del caso 1; nello specifico, il caso 3, abilitato a fornire un servizio di regolazione per 6 ore continuative, è quello che porta ad ottenere i risultati migliori, tali da raggiungere quasi il completo ritorno dell'investimento nell'intervallo temporale considerato. Analizzando nello specifico questo caso, si può osservare in Figura 6.4 che durante la durata del contratto sono state accettate 193 offerte su un totale di 260 presentate; la maggior parte di esse è stata accettata al valore di minimo limite (pari a 75 €/MWh per la condizione A). Solo 10 sono state accettate ad un valore maggiore, per un prezzo non superiore a 136 €/MWh. Nei primi mesi del periodo contrattuale solo un'offerta è stata accettata; gli elevati ricavi di quel periodo non hanno difatti permesso di fare offerte (per la condizione A: incremento di 30 €/MWh rispetto al valore di offerta minima) abbastanza basse da poter essere accettate dal gestore di rete. Tra maggio e luglio del 2019 il profitto del Data Center è tornato positivo, con valori tali che l'offerta minima

incrementata risultava troppo elevata per poter essere accettata e portare ad un ulteriore ricavo.

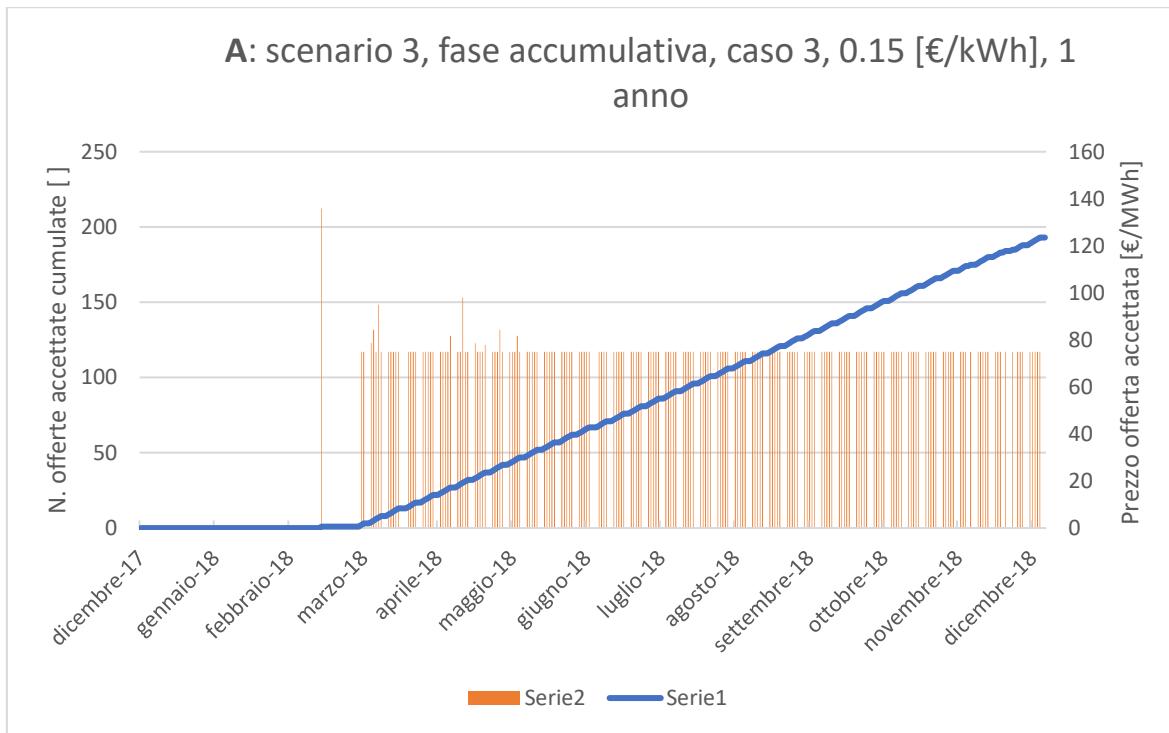


Figura 6.4: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione A

La seconda condizione analizzata, denominata **B**, è quella in cui un Data Center di 1 [MW] di potenza installata inizi l'attività di mining il primo giorno della *fase distributiva* dello scenario 3, sempre assumendo validi i parametri del caso studio, ossia costo di energia elettrica di 0,15 [€/kWh] e durata del contratto di 1 anno. Il grafico del NCF ottenuto nel periodo ad esso associato viene riportato in Figura 6.5.

6. Risultati e analisi

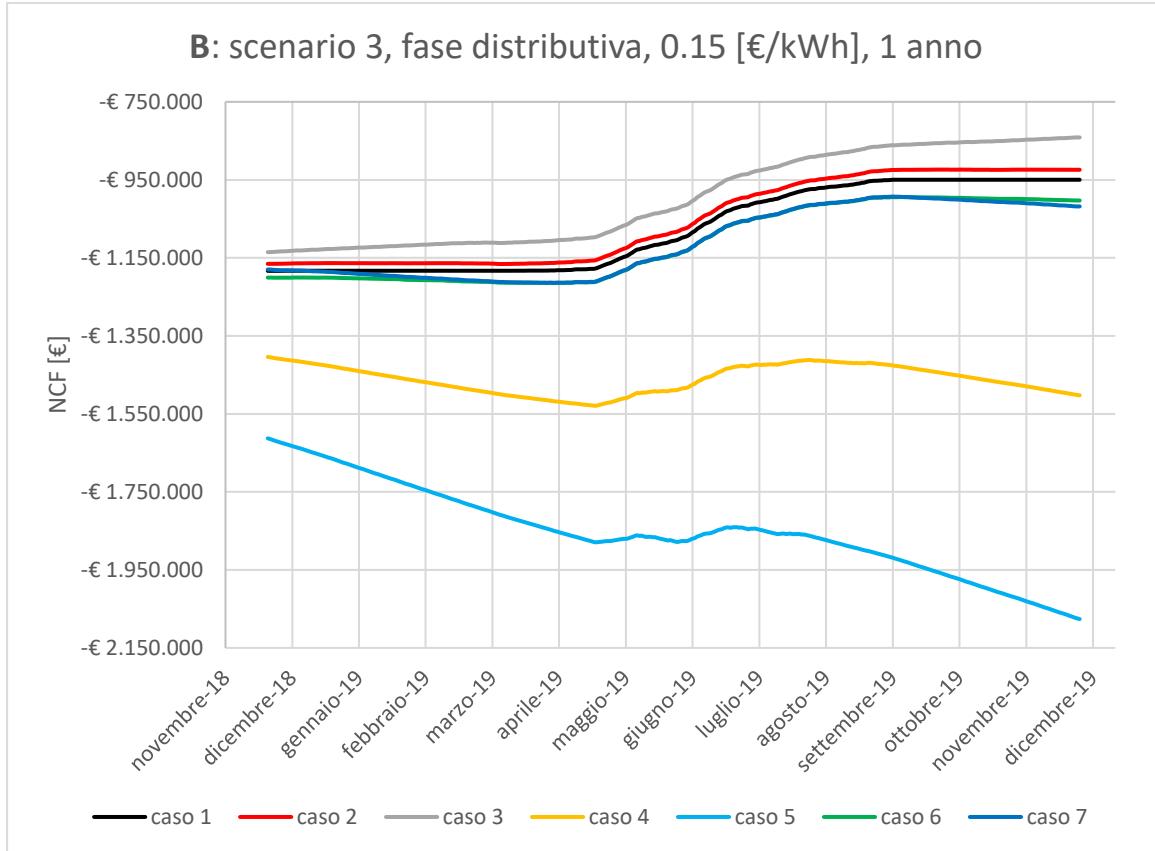


Figura 6.5: NCF per condizione B

In Figura 6.5 si può notare come, in generale, avviare un’attività durante la fase distributiva, per le condizioni del caso studio, ad eccezione dei casi 4-5, risulta portare un cash flow positivo all’interno dell’intervallo temporale di riferimento, ma difficilmente tale da poterlo ripagare in futuro. La convenienza o meno dipenderà dalla vita utile dei miner, ossia dalla velocità in cui la loro efficienza diventa obsoleta, e dai margini di profitto che inesorabilmente si assottiglieranno con il passare del tempo.

Il caso 3, forte dei suoi minori costi d’investimento iniziali e dei maggiori valori di cash flow, è quello che ha registrato le migliori performance economiche; analizzando nello specifico questo caso, si può osservare in Figura 6.6 che durante la durata del contratto sono state accettate 201 offerte, la maggior parte delle quali al valore di minimo limite (pari a 70 €/MWh per la condizione B). Solo 14 sono state le offerte accettate ad un valore maggiore quello di minimo limite, per un prezzo non superiore a 92 €/MWh. Tra maggio e luglio del 2019 il profitto del Data Center è tornato positivo, con valori tali che l’offerta minima

incrementata (valore di incremento pari a 10 €/MWh, vedi Tabella 6.3) era troppo elevata per poter essere accettata. In questo periodo si è avuto il maggior tasso di incremento del NCF in confronto all’intero intervallo considerato.

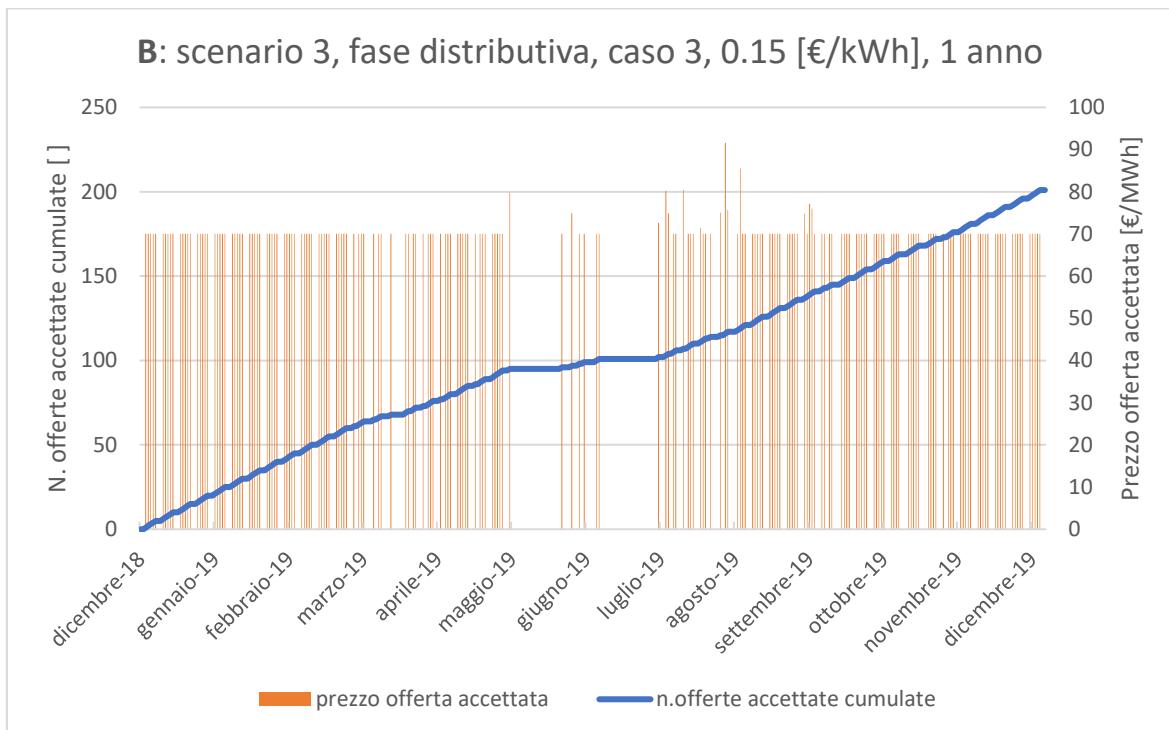


Figura 6.6: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione B

La terza condizione analizzata, denominata **C**, è quella in cui un Data Center di 1 [MW] di potenza installata inizi l’attività di mining il primo giorno della *fase trend* dello scenario 2 (l’unico che potesse offrire un orizzonte temporale di 1 anno in questa fase), sempre assumendo validi i parametri del caso studio, ossia costo di energia elettrica pari a 0,15 [€/kWh] e durata del contratto di 1 anno. Il grafico del NCF ottenuto nel periodo ad esso associato è stato riportato in Figura 6.7.

6. Risultati e analisi

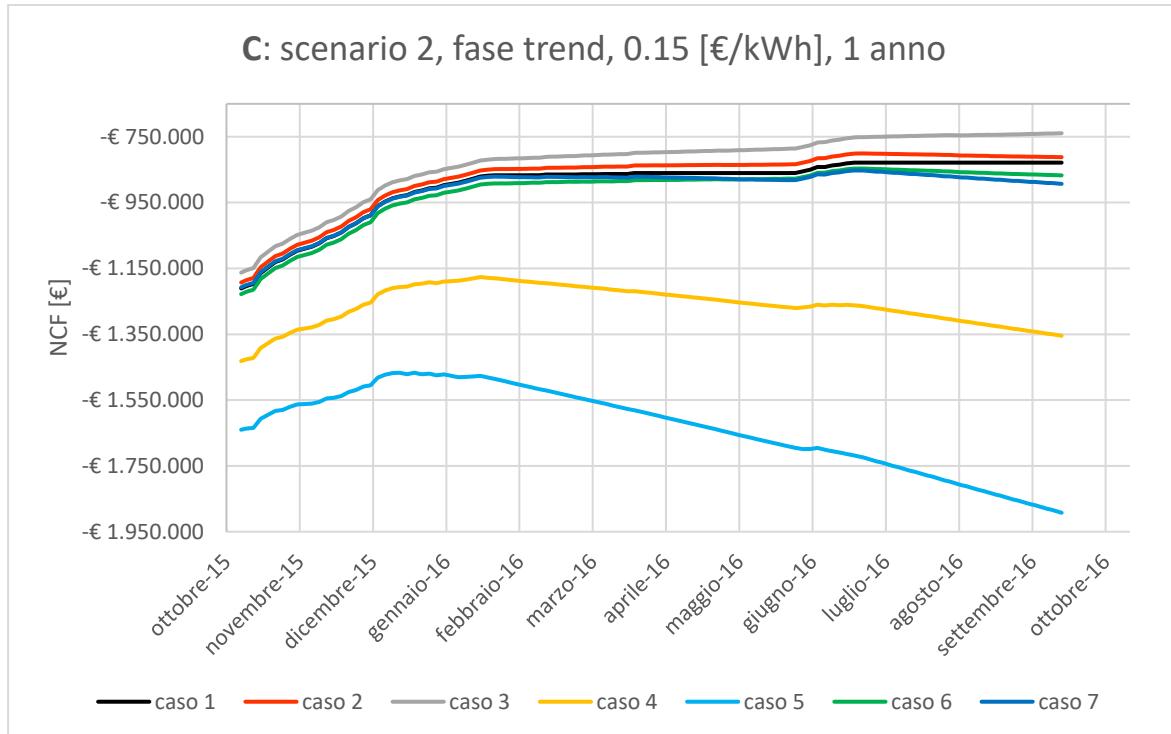


Figura 6.7: NCF per condizione C

In Figura 6.7 si può notare come, per le condizioni del caso studio, avviare un’attività di mining durante la fase trend, ad eccezione del caso 5, porti ad un cash flow positivo (ricavi operativi meno costi operativi) anche se non sufficiente a ripagare l’investimento; il Net Cash Flow si mantiene infatti negativo fino alla fine del contratto. In generale si ottengono dei risultati migliori rispetto alla fase distributiva.

Il caso 3 risulta essere quello economicamente più conveniente. Analizzando nello specifico proprio questo caso, si può osservare in Figura 6.8 che nel corso del contratto sono state accettate 180 offerte (su 262 presentate), la maggior parte delle quali al valore di minimo limite (pari a 55 €/MWh per la condizione C). Le offerte accettate ad un valore maggiore quello di minimo limite sono state 19 (incremento di 35 [€/MWh] rispetto al valore di offerta minima), ad un prezzo massimo di 148 €/MWh. Similmente alla condizione A, nei primi mesi gli elevati profitti non hanno permesso di poter fare offerte all’interno del range di accettabilità della fase ex-ante del MSD e le offerte accettate sono state poche. Nel successivo periodo i profitti si sono ridotti, diventando talvolta negativi: sono state quindi

fatte e accettate numerose offerte al prezzo minimo limite (55 €/MWh) che hanno permesso un cash flow più elevato rispetto al caso 1.

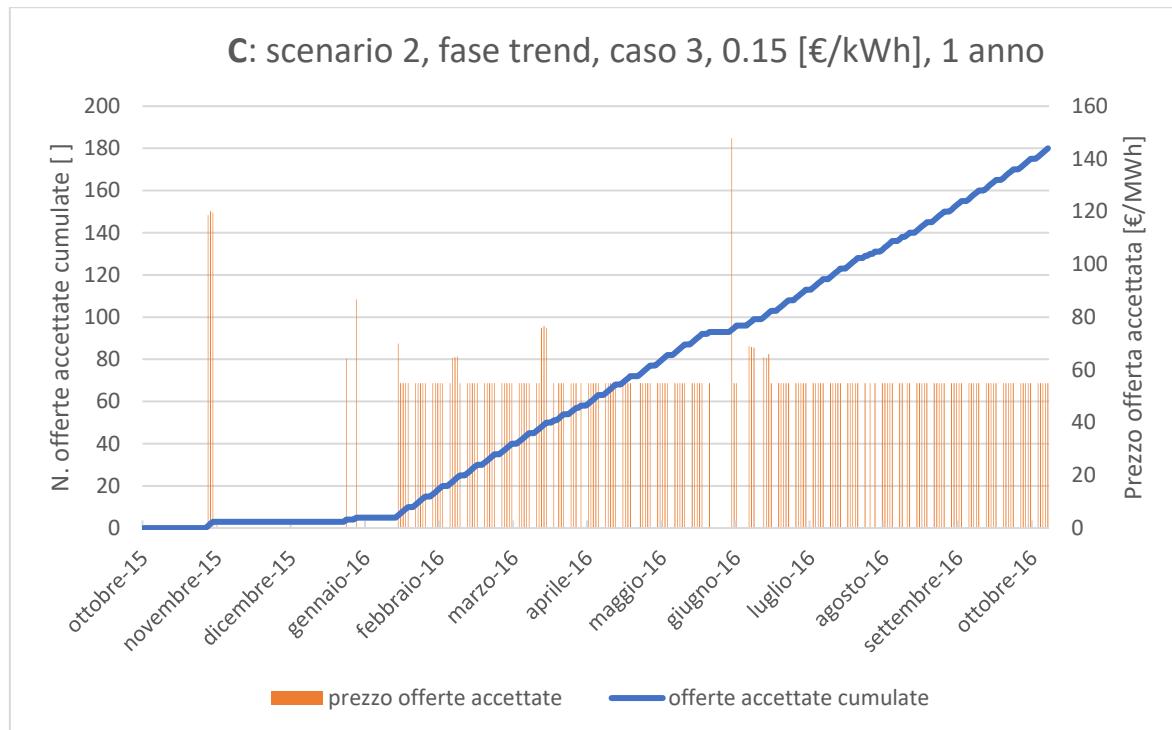


Figura 6.8: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione C

6.4 Confronti grafici

Si effettueranno tre tipologie di confronti, nei quali verrà mantenuto fisso almeno uno dei due parametri del caso studio. Essi sono:

- Confronto tra diversi scenari
- Confronto tra diversi costi di energia elettrica
- Confronto tra diverse durate di contratto

6. Risultati e analisi

6.4.1 Confronto tra diversi scenari

Si faranno 3 confronti tra le 6 combinazioni possibili ottenibili considerando il costo di corrente elettrica pari a quello del caso studio (0,15 €/kWh).

Il primo confronto, riportato in Figura 6.9, sarà tra le seguenti condizioni:

- D) scenario 3, fase distributiva, 6 mesi di contratto
- E) scenario 2, fase distributiva, 6 mesi di contratto

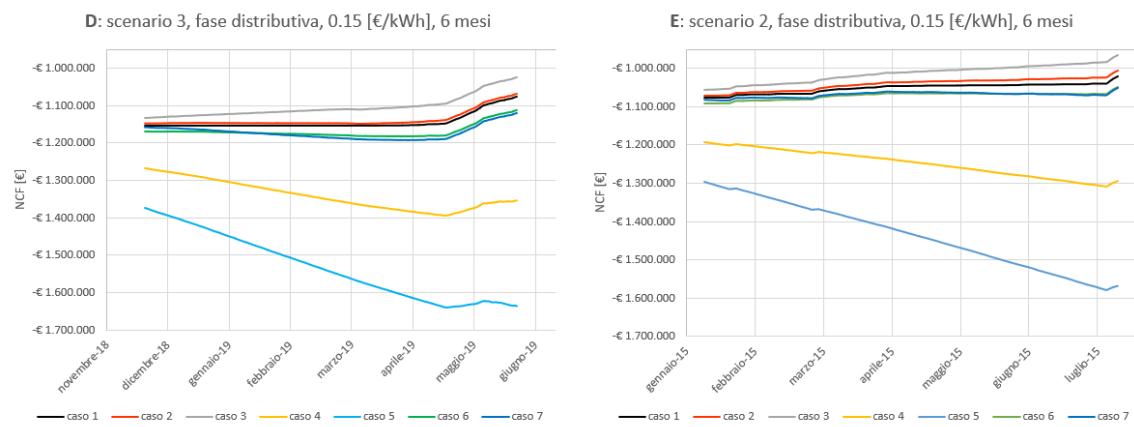


Figura 6.9: Confronto NCF tra condizione D e E

I Net Cash Flow nella fase distributiva degli scenari 2 e 3 per un contratto stipulato della durata di 6 mesi seguono un andamento abbastanza simile, tendenzialmente piatto o poco profittevole per i casi 1 e 2, crescente anche se moderatamente profittevole per il caso 3 e costantemente in perdita per i casi 4 e 5. L'unica differenza è osservabile nei casi 6 e 7 che nello scenario 3, per la maggior parte del tempo, hanno un Cash flow negativo, contrariamente a quanto accade nello scenario 2. Quantitativamente, però, si ha che al termine del contratto i Cash Flow presentano valori molto simili (vedi Tabella 6.5 e Tabella 6.6).

6. Risultati e analisi

condizione D	Caso						
	1	2	3	4	5	6	7
I [€]	- 1.153.345	- 1.149.335	- 1.134.324	- 1.269.128	- 1.373.867	- 1.169.494	- 1.169.494
NCF a fine contratto[€]	- 1.076.665	- 1.069.069	- 1.024.361	- 1.354.622	- 1.636.548	- 1.111.865	- 1.111.865
CF a fine contratto[€]	76.680	80.265	109.962	85.494	262.682	57.629	57.629

Tabella 6.5: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione D

condizione E	Caso						
	1	2	3	4	5	6	7
I [€]	- 1.075.536	- 1.071.462	- 1.056.172	- 1.191.477	- 1.296.158	- 1.091.904	- 1.081.576
NCF a fine contratto[€]	- 1.020.399	- 1.004.489	- 965.462	- 1.293.761	- 1.568.441	- 1.048.505	- 1.051.684
CF a fine contratto[€]	55.137	66.973	90.710	102.284	272.283	43.399	29.892

Tabella 6.6: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione E

Il secondo confronto, riportato in Figura 6.10, sarà tra le seguenti condizioni:

B) scenario 3, fase distributiva, 1 anno di contratto

F) scenario 2, fase distributiva, 1 anno di contratto

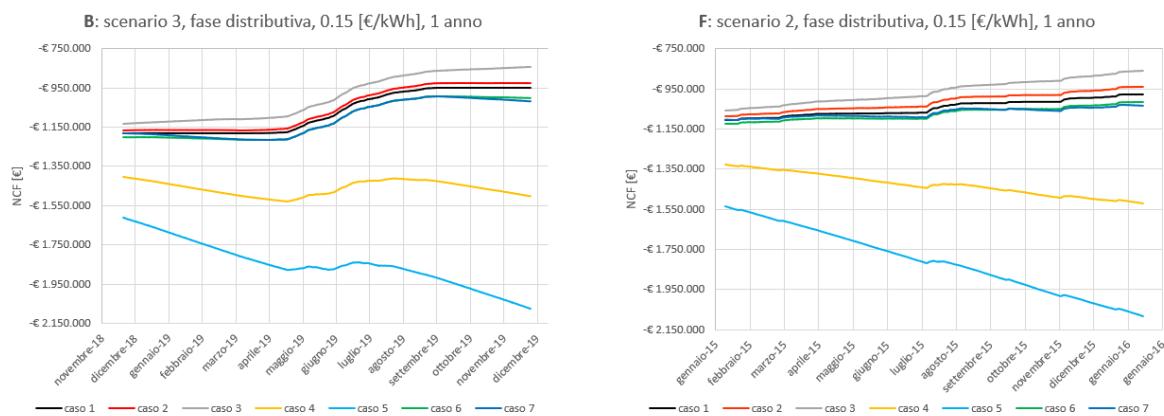


Figura 6.10: Confronto NCF tra condizione B e F

Anche qualora la durata del contratto risultasse di 1 anno, i NCF della fase distributiva degli scenari 2 e 3, come per il confronto precedente disegnano un percorso simile, con l'unica

6. Risultati e analisi

differenza che la crescita del NCF nel periodo centrale dell'intervallo è più accentuata nello scenario 3; i valori di Net Cash Flow a fine contratto, però, risulteranno quasi gli stessi. (vedi Tabella 6.7 e Tabella 6.8).

condizione B	Caso						
	1	2	3	4	5	6	7
I [€]	- 1.183.345	- 1.165.324	- 1.135.302	- 1.404.067	- 1.612.745	- 1.200.571	- 1.179.899
NCF a fine contratto[€]	- 949.746	- 924.227	- 841.337	- 1.502.485	- 2.076.137	- 1.002.988	- 1.018.196
CF a fine contratto[€]	233.599	241.096	293.964	98.417	463.392	197.583	161.703

Tabella 6.7: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione B

condizione F	Caso						
	1	2	3	4	5	6	7
I [€]	- 1.105.536	- 1.087.444	- 1.057.136	- 1.326.359	- 1.534.922	- 1.122.983	- 1.102.328
NCF a fine contratto[€]	- 980.045	- 941.442	- 858.775	- 1.519.364	- 2.081.781	- 1.015.945	- 1.033.552
CF a fine contratto[€]	125.491	146.003	198.361	193.005	546.859	107.038	68.776

Tabella 6.8: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione F

Il terzo confronto, riportato in Figura 6.11, sarà tra:

G) scenario 3, fase trend, 6 mesi di contratto

H) scenario 2, fase trend, 6 mesi di contratto

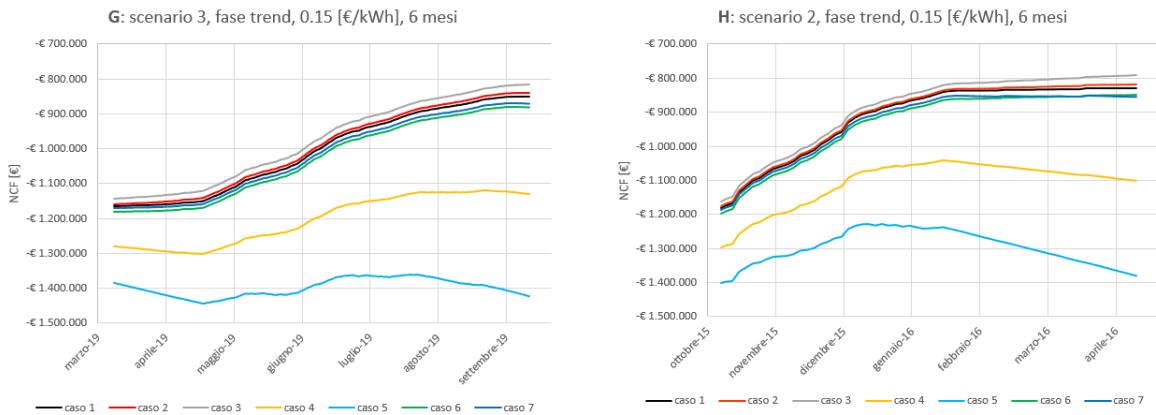


Figura 6.11: Confronto NCF tra condizione G e H

Si può notare come i percorsi dei NCF tra i due scenari siano piuttosto diversi: nello scenario 3 (condizione G), nella prima metà del contratto si hanno curve con concavità rivolta verso l'alto mentre per lo scenario 2 (condizione H) le concavità sono rivolte verso il basso. Nonostante questo, il NCF a fine contratto risulta paragonabile (vedi Tabella 6.9 e Tabella 6.10). Anche nella fase di trend si può quindi affermare che c'è coerenza tra i due scenari.

condizione G	Caso						
	1	2	3	4	5	6	7
I [€]	- 1.163.544	- 1.159.335	- 1.144.125	- 1.279.410	- 1.384.111	- 1.179.695	- 1.169.364
NCF a fine contratto [€]	- 849.252	- 838.544	- 815.311	- 1.130.781	- 1.423.762	- 879.816	- 869.920
CF a fine contratto [€]	314.292	320.791	328.814	148.629	39.651	299.879	299.444

Tabella 6.9: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione G

condizione H	Caso						
	1	2	3	4	5	6	7
I [€]	- 1.210.839	- 1.192.825	- 1.162.811	- 1.431.503	- 1.640.123	- 1.228.067	- 1.207.403
NCF a fine contratto [€]	- 860.304	- 836.190	- 794.747	- 1.236.209	- 1.619.060	- 880.210	- 874.833
CF a fine contratto [€]	350.534	356.635	368.064	195.294	21.063	347.857	332.570

Tabella 6.10: Investimento iniziale, NCF e CF a fine contratto nella condizione H

6. Risultati e analisi

Una volta constatato attraverso questi tre confronti che i due scenari sono confrontabili, per i successivi confronti ci si focalizzerà, quando possibile, solo sullo scenario 3. A volte, però, sarà necessario utilizzare anche lo scenario 2.

6.4.2 Confronto tra diversi prezzi di energia elettrica

Si vuole valutare l'impatto che ha il costo di energia elettrica sul NCF nel corso della durata del contratto. Basandosi sul caso studio, si farà variare il prezzo dell'energia elettrica da 0,15 [€/kWh] a 0,10 [€/kWh]. Verranno fatti 3 confronti, ognuno per una fase diversa.

Il primo confronto, riportato in Figura 6.12, sarà tra le seguenti condizioni:

- A) scenario 3, fase accumulativa, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]
- I) scenario 3, fase accumulativa, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,10 [€/kWh]

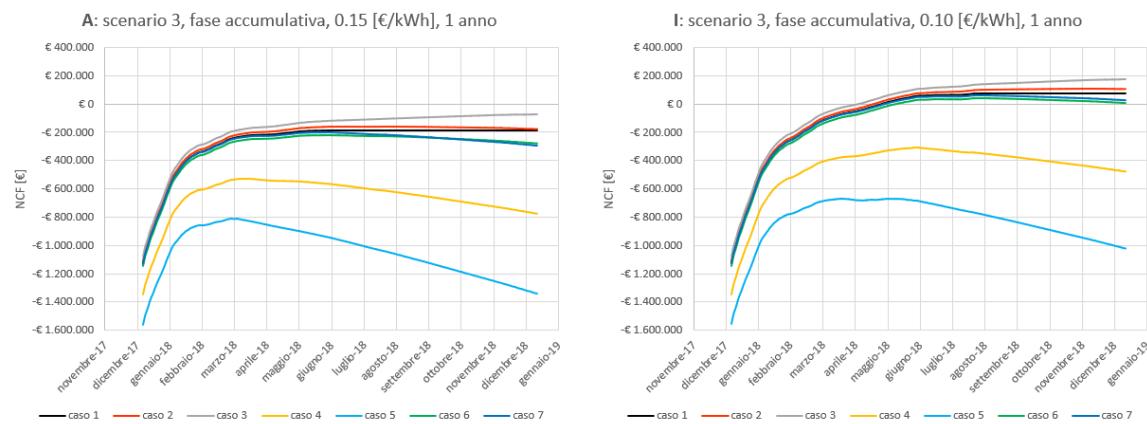


Figura 6.12: Confronto NCF tra condizione A e I

Dalla Figura 6.12 si nota che la riduzione del costo di corrente elettrica ha portato al ritorno dell'investimento entro il periodo contrattuale per tutti i casi considerati, eccezione per i soliti casi 4-5. Il caso 3 risulta essere, come sempre, quello che ottiene il risultato economico migliore.

Confrontando la Figura 6.4 (relativa alla condizione A) con la Figura 6.13 (relativa alla condizione I) si osserva che passando da un costo di 0,15 [€/kWh] a 0,10 [€/kWh] il numero di offerte accettate scende da 193 a 153, anche se il numero di offerte accettate sopra il valore di offerta minima limite sale da 10 a 18. Riducendo il costo di energia elettrica si assiste difatti ad un aumento della profittabilità del Data Center con un conseguente aumento dell'offerta minima e quindi riduzione delle offerte accettate. Questa condizione, però, non porta ad una riduzione del cash flow; si avrà solo un minor valore aggiunto a livello economico dal servizio di regolazione.

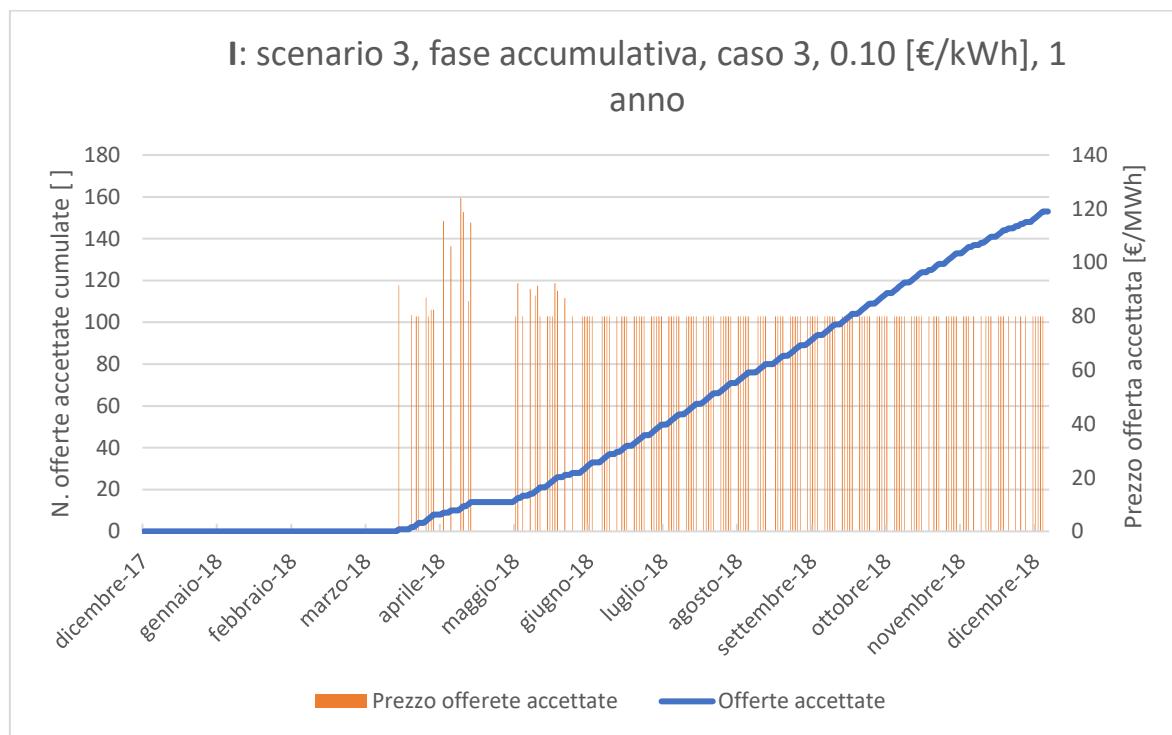


Figura 6.13: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione I

Il secondo confronto, riportato in Figura 6.14, sarà tra le seguenti condizioni:

- B) scenario 3, fase distributiva, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]
- L) scenario 3, fase distributiva, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,10 [€/kWh]

6. Risultati e analisi

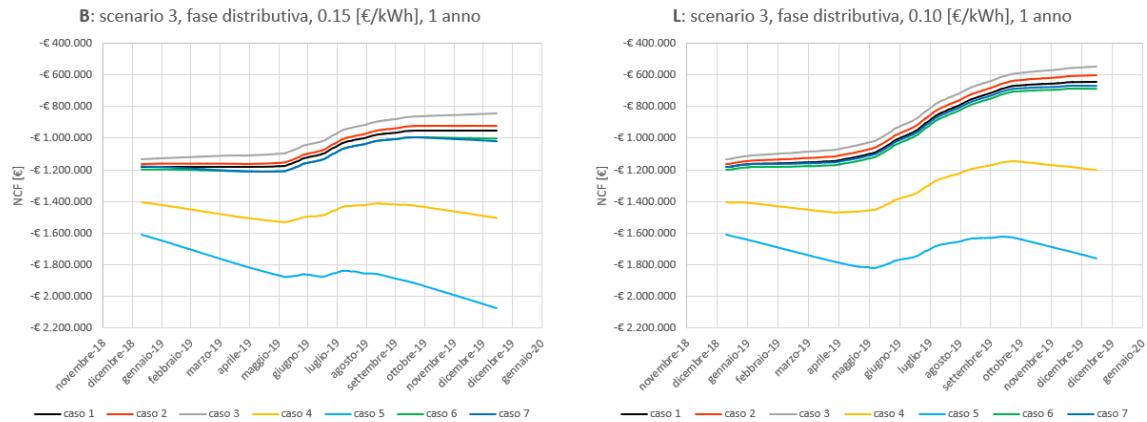


Figura 6.14: Confronto NCF tra condizione B e L

Dalla Figura 6.14 si osserva che la riduzione del costo di corrente elettrica porta ad un notevole beneficio al NCF anche se, per la fase distributiva, esso rimane sempre negativo; è interessante notare che in 1 anno, per i casi 1,2,3,6,7 si è recuperato metà dell'investimento. Resta solo da valutare se il restante 50% riuscirà ad essere recuperato nei successivi cicli, previa obsolescenza dell'hardware di mining.

Confrontando la Figura 6.6 (relativa alla condizione B) con la Figura 6.15 (relativa alla condizione L) si osserva che passando da un costo di 0,15 [€/kWh] a un costo di 0,10 [€/kWh] il numero di offerte accettate scende da 201 a 145, di cui 14 sopra il valore minimo limite; come per il confronto precedente, questa riduzione è dovuta al maggior valore delle offerte, causato a loro volta dai maggiori profitti.

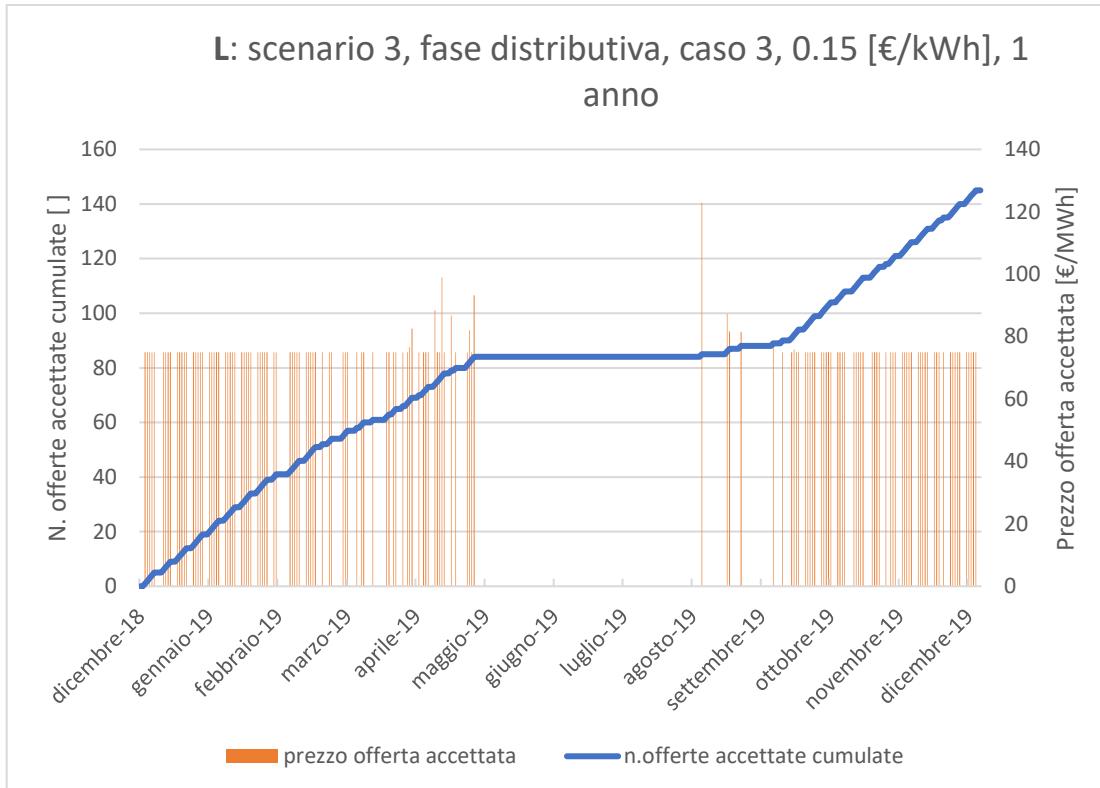


Figura 6.15: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione L

Il terzo confronto, riportato in Figura 6.16, sarà fatto tra:

C) scenario 2, fase trend, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]

M) scenario 2, fase trend, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,10 [€/kWh]

Esso è stato fatto considerando lo scenario 2 perché nello scenario 3 non si ha una fase trend con una durata di contratto di 1 anno.

6. Risultati e analisi

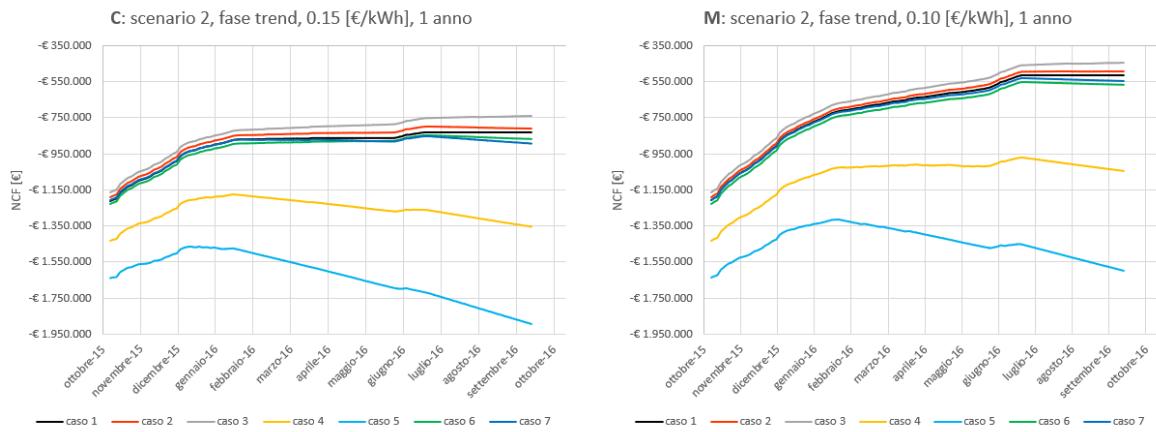


Figura 6.16: Confronto NCF tra condizione C e M

Dalla Figura 6.16 si nota che la riduzione del costo di corrente elettrica porta, come per la fase distributiva, al 50% del ritorno dell'investimento entro il periodo contrattuale con però un NCF di fine contratto più elevato.

Confrontando la Figura 6.7 (relativa alla condizione C) con la Figura 6.17 (relativa alla condizione M) si osserva che passando da un costo di 0,15 [€/kWh] a un costo di 0,10 [€/kWh] il numero di offerte accettate scende da 180 a 124, di cui ben 37 sopra il valore minimo limite (rispetto alle precedenti 19).

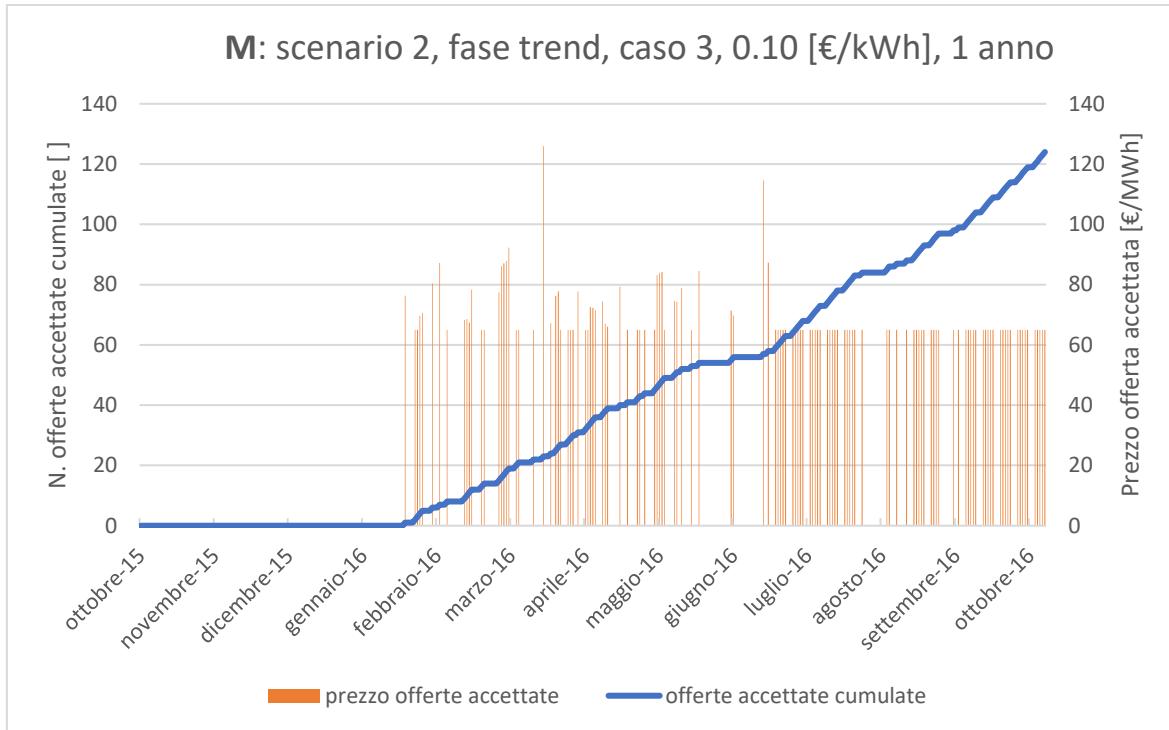


Figura 6.17: N. offerte accettate cumulate e prezzo offerta accettata per condizione M

6.4.3 Confronto tra diverse durate di contratto

Si vuole valutare l'impatto che ha una diversa durata di contratto sul NCF.

Basandosi sul caso studio, si farà variare la durata del contratto da 1 anno a 6 mesi. Verranno fatti 3 confronti, ognuno per una fase diversa.

Il primo confronto, riportato in Figura 6.18, sarà fatto tra:

A) scenario 3, fase accumulativa, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]

N) scenario 3, fase accumulativa, 6 mesi di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]

6. Risultati e analisi

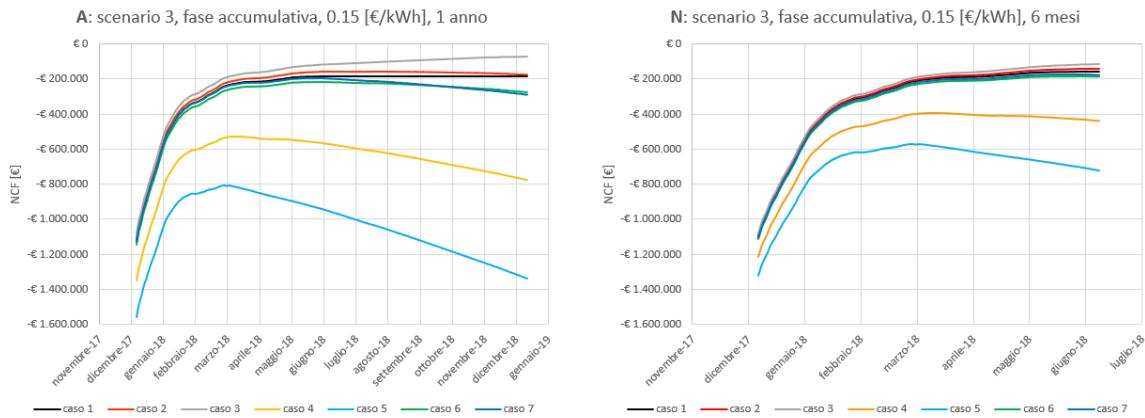


Figura 6.18: Confronto NCF tra condizione A e N

In Figura 6.18 si può notare che, anche se in misura poco evidente, i casi 3 e 7, ossia quelli che forniscono un servizio di regolazione di 6 ore, dopo un periodo contrattuale di 6 mesi abbiano un NCF maggiore rispetto alle medesime tipologie di impianto che offrono un servizio per 3 ore. Una situazione opposta verrebbe invece riscontrata qualora la durata del contratto fosse di 1 anno (condizione A).

Le curve dei casi di regolazione nella condizione A si differenziano rispetto a quelle nella condizione N essenzialmente per i diversi costi di investimento e ricavi fissi: si era difatti ipotizzata una quota di ammortamento del GE o UPS proporzionale al rapporto tra la durata del contratto e la vita utile del sistema considerato. Per quanto riguarda la remunerazione della componente fissa, un contratto di 6 mesi permette di ottenere la metà rispetto a quello di 1 anno (15.000 €/MW/anno invece che 30.000). I casi 4,5,6,7 quindi, subiscono uno sfasamento verso il basso, più accentuato nella condizione A.

Il secondo confronto, riportato in Figura 6.19, sarà fatto tra:

- B) scenario 3, fase distributiva, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]
- D) scenario 3, fase distributiva, 6 mesi di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]

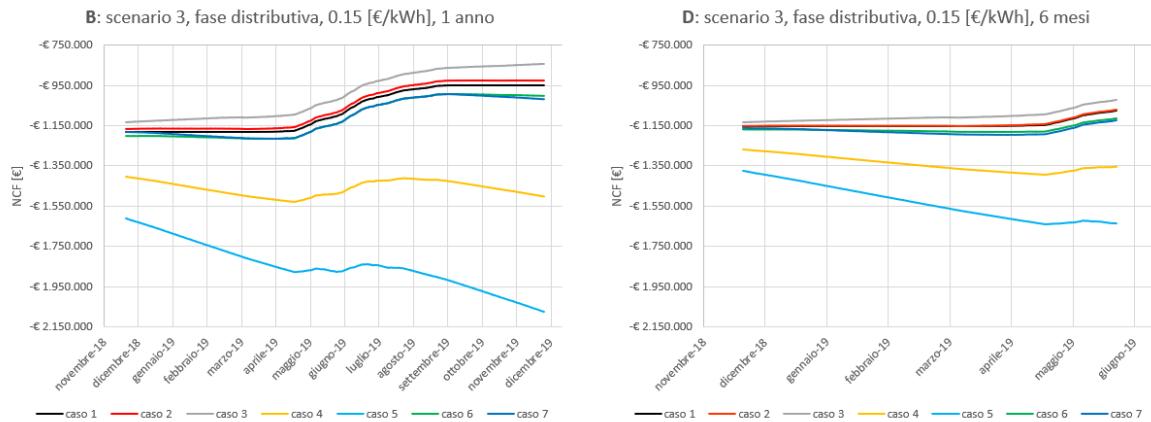


Figura 6.19: Confronto NCF tra condizione B e D

Un’attività di mining iniziata il primo giorno di fase distributiva e protratta per un periodo di 1 anno invece che di 6 mesi porta ad un miglioramento del NCF e quindi della convenienza economica; eccezione per i casi 4-5, per i quali il contratto di 1 anno porterebbe ad avere perdite elevate, soprattutto per il caso 5.

Il terzo confronto, riportato in Figura 6.20, sarà fatto tra:

C) scenario 2, fase trend, 1 anno di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]

H) scenario 2, fase trend, 6 mesi di contratto, costo en. el. 0,15 [€/kWh]

Anche in questo caso il terzo confronto è stato fatto considerando lo scenario 2 invece che lo scenario 3 perché quest’ultimo non possiede una fase trend con una durata di contratto di 1 anno.

6. Risultati e analisi

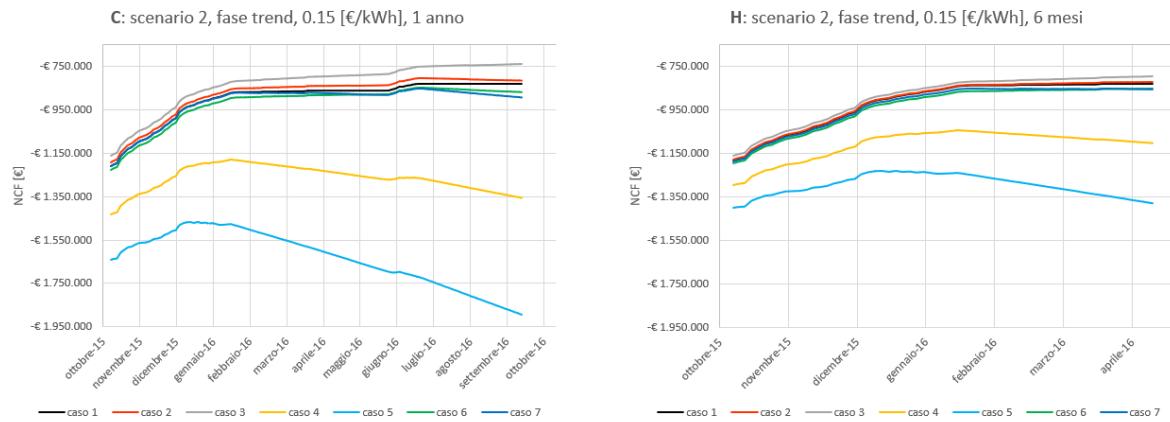


Figura 6.20: Confronto NCF tra condizione C e H

Per la fase di *trend*, stipulare 1 anno di contratto è più conveniente praticamente solo per il caso 3, anche se per i casi 1,2,6,7 si hanno NCF di fine contratto simili rispetto a una durata di contratto pari a 6 mesi. Il caso 5, come sempre, subisce maggiori perdite all'aumentare della durata del contratto.

7 Conclusioni

La configurazione del Data Center che, dalle simulazioni effettuate, risulta essere quella più interessante nella fornitura di un servizio di flessibilità alla rete di dispacciamento (per la zona nord del mercato elettrico italiano) è quella che non possiede alcun sistema di accumulo o gruppo elettrogeno di emergenza: i costi di investimento e i costi operativi, infatti, sarebbero tali da non rendere conveniente una loro installazione. Nello specifico, il caso che risulta essere, in qualsiasi condizione operativa, il più conveniente è quello che offre, nell'ottica dei progetti pilota, un servizio di regolazione per 6 ore continuative: rispetto a quello in cui vengono offerte 3 ore, ha il vantaggio di avere una remunerazione fissa doppia (60.000 €/MWh invece di 30.000 €/MWh) e, ogni qualvolta viene accettata un'offerta, il doppio del valore incrementale con il quale è stata maggiorata l'offerta minima calcolata. In generale, inoltre, fornire il servizio di regolazione permette di ottenere dei guadagni anche nei periodi in cui, ad esempio, a causa di un'improvvisa riduzione del prezzo di bitcoin, si vengono a creare profitti negativi tali da condurre allo spegnimento delle apparecchiature di mining.

Si avrebbe quindi un beneficio reciproco tra la rete elettrica e il Data Center di mining se quest'ultimo fornisse un servizio di regolazione: il primo, infatti, guadagnerebbe nuove risorse di flessibilità mentre il secondo aumenterebbe i suoi profitti. Inoltre, per quanto riguarda il vincolo di 400 €/MWh come prezzo di offerta massimo, si può notare che esso non porterebbe risvolti negativi, perlomeno per i costi di corrente elettrica considerati.

In generale, però, la vita utile di un miner (hardware che svolge il processo di mining) è funzione sia del costo di corrente elettrica che dell'efficienza dei calcoli computazionali che esso svolge; se il valore del primo dipende da scelte economico-politiche del paese nel quale si usufruisce del servizio, il secondo subisce l'avanzamento inarrestabile dell'obsolescenza,

7. Conclusioni

dettata dal continuo progresso tecnologico. I ricavi che si hanno in un determinato intervallo temporale, quindi, difficilmente si ripeteranno in quello successivo.

In un contesto nazionale dove il prezzo dell'energia elettrica risulta essere ancora piuttosto caro, il fatto che esso rappresenti la principale voce di costo operativo di un Data Center di mining, si rivela essere un dissuasore per lo sviluppo e la diffusione di questa attività industriale, anche se la fornitura del servizio di regolazione permetterebbe un maggiore flusso netto di cassa. Una riduzione del costo di corrente elettrica da 0,15 €/kWh a 0,10 €/kWh, installando ad esempio maggiori potenze (almeno 10 MW), permetterebbe di guardare con più interesse verso questa attività, ma non del tutto convincere gli investitori: il ritorno di metà dell'investimento nell'arco di 1 anno di tempo, condizione che si verifica qualora l'attività venga avviata nella fase distributiva o di trend del ciclo finanziario di bitocin, risulta infatti solo apparentemente un dato positivo ma, non conoscendo l'esatta durata di vita utile dell'impianto, potrebbe non rivelarsi tale. L'investitore, infatti, dovrebbe investire ingenti quantità di denaro in un'attività la cui profittabilità è funzione anche dal prezzo di bitcoin, per sua natura molto volatile a causa della relativa piccola capitalizzazione; un prezzo di energia elettrica al limite del ritorno economico renderebbe quindi troppo rischioso questo investimento. La scelta di un investimento dovrebbe difatti essere economicamente interessante, qualsiasi sia la fase del mercato di bitcoin nella quale ci si trovi. Per avere costi di corrente più bassi bisognerebbe avere accesso ad energia proveniente, ad esempio, da centrali idroelettriche gestite da privati, ma a quel punto il servizio di regolazione non sarebbe più attuabile.

In conclusione, si può affermare che la fornitura del servizio di flessibilità da parte di un Data Center che svolge il processo di mining impatterebbe positivamente a livello economico ma, nell'attuale contesto elettrico italiano, non sufficientemente da convincere nuovi imprenditori ad investire nel settore del mining. La fornitura di questa nuova risorsa di flessibilità risulta quindi, alle condizioni attuali, non percorribile.

Rimarrebbero comunque alcune criticità sulle ipotesi fatte:

- lo spegnimento di un Data Center che si trova in condizioni di profitto negativo e la sua accensione un'ora prima della fascia oraria di possibile regolazione;
- l'accettazione di tutte le ore offerte;
- tutte le offerte accettate vengono poi attivate.

Sarebbe quindi da valutare quale fattore riduttivo comporterebbe la non idealità di queste ipotesi.

Qualora i costi di corrente elettrica subissero una riduzione e le ipotesi fatte risultassero abbastanza realistiche, sarebbe interessante valutare l'utilizzo del Data Center di mining come nuova risorsa di flessibilità anche all'interno di altre zone di mercato, dove magari si creano frequenti congestioni e le offerte vengono accettate a prezzi più elevati.

Simbologia

Simbolo	UdM	Descrizione
AC		Alternata – Continua
ARERA		Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente
ASIC		Application Specific Integrated Circuits
BSP		Balance Service Provider
BTC		Bitcoin
C_{ad}	[€]	Costo adeguamento impianto
$C_{ad,GE}$	[€]	Costo adeguamento impianto Gruppo Elettrogeno
$C_{ad,UPS}$	[€]	Costo adeguamento impianto UPS
$C_{ad,op}$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$	Costo adeguamento operativo
$C_{ad,op,GE}$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$	Costo adeguamento operativo Gruppo Elettrogeno
$C_{ad,op,UPS}$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$	Costo adeguamento operativo UPS
C_{el}	$\left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$	Costo energia elettrica
C_{fuel}	$\left[\frac{\text{€}}{\text{L}} \right]$	Costo combustibile Gruppo Elettrogeno
c_g	[L]	Volume gasolio consumato
\dot{c}_g	$\left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]$	Consumo specifico gasolio
C_g	$\left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right]$	Costo operativo giornaliero
C_{GE}	$\left[\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right]$	Costo su unità di potenza del Gruppo Elettrogeno
$C_{loss,UPS} (t)$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{t}} \right]$	Costi legati alla perdita di capacità UPS
$C_{O&M}$	[€]	Costo O&M

Simbologia

C_{rate}		Discharge rate
$C_{rete,UPS} (t)$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{t}} \right]$	Costo operativo caricamento UPS
C_{rif}	$\left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$	Costo di riferimento
C_{tot}	[€]	Costo GE nell'arco della sua vita utile
CA		Continua – Alternata
CED		Centro di Elaborazione Dati
CPU		Central Processing Unit
D		Giorno di riferimento
D-1		Giorno precedente il giorno di riferimento
DOD	[%]	Depth of Discharge
ECDSA		Elliptic Curve Digital Signature Algorithm
EMA		Exponential Moving Average
ENTSO-E		European Network of Transmission System Operators for Electricity
FPGA		Field Programmable Gate Array
FPPS		Full Pay Per Share
GAUDÌ		Gestione Anagrafica Unica Degli Impianti di produzione
GE		Gruppo Elettrogeno
GME		Gestore dei Mercati Energetici
GMT		Greenwich Mean Time
GPU		Graphics Processing Unit
I_{DC}	[€]	Costo d'investimento Data Center
I_{GE}	[€]	Costo d'investimento Gruppo Elettrogeno
I_{UPS}	[€]	Costo d'investimento UPS
$I_{amm,GE}$	[€]	Quota ammortamento investimento Gruppo Elettrogeno
$I_{amm,UPS}$	[€]	Quota ammortamento investimento UPS
IPO		Initial Public Offering
ISO		International Standard Organization
IT		Information Technology

\dot{m}_{comb}	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	Portata massica del combustibile
MB		Mercato del Bilanciamento
MGP		Mercato del Giorno Prima
MI		Mercato Infragiornaliero
MPE		Mercato Elettrico a Pronti
MPEG		Mercato dei Prodotti Giornalieri
MSD		Mercato del Servizio di Dispacciamento
MSD ex-ante		Fase di programmazione del MSD
MT		Media Tensione
MTE		Mercato Elettrico a Termine
n_{reg}	$\left[\frac{\text{interventi}}{\text{anno}} \right]$	Frequenza dei cicli annuali
$n_{u,\text{GE}}$	[unità]	Numero di unità di cui si compone il Gruppo Elettrogeno
N_c	[cicli]	Numero di cicli vita
NCF		Net Cash Flow
NIST		National Institute of Standard and Technology
O&M		Operation and Maintenance
\bar{P}	$\left[\frac{\%}{\text{anno}} \right]$	Perdita di capacità media annua
P_{ciclo}	$\left[\frac{\%}{\text{ciclo}} \right]$	Perdita di capacità di carica permanente per ogni ciclo
$\overline{P_{\text{ciclo}}}$	$\left[\frac{\%}{\text{anno}} \right]$	Perdita di capacità di carica permanente per ogni ciclo media annua
P_{eff}	[kW]	Potenza efficiente
P_{fuel}	$\left[\frac{\text{€}}{\text{L}} \right]$	Prezzo gasolio
\bar{P}_p	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$	Prezzo medio ponderato a salire zonale giornaliero
$\overline{P_{p,m}}$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$	Prezzo medio ponderato minimo a salire zonale giornaliero
$\overline{P_{p,M}}$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$	Prezzo medio ponderato marginale a salire zonale giornaliero

Simbologia

P_{s-d}	$\left[\frac{\%}{\text{anno}} \right]$	Perdita di capacità di carica dovuta ad autoconsumo
\overline{P}_{s-d}	$\left[\frac{\%}{\text{anno}} \right]$	Perdita di capacità di carica dovuta ad autoconsumo media annua
P_{UPS}	$\left[\frac{\%}{\text{anno}} \right]$	Perdita di capacità di carica accumulatore
PCE		Piattaforma Conti Energia
PCI_{comb}	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	Potere Calorifico Inferiore del combustibile
PdR		Piano di Riaccensione
PMC		Potenza Massima di Controllo
PoW		Proof of Work
PUE		Power Usage Effectiveness
PUN		Prezzo Unico Nazionale
P2P		Peer-to-Peer
PPLNS		Pay Per Last N Shares
PPS		Pay Per Share
PPS+		Pay Per Share plus
\dot{Q}_{DC}	$[\text{kW}]$	Potenza installata Data Center
Q_{DC}	$[\text{kWh}]$	Energia richiesta dal Data Center
$Q_{\text{disp}}(t)$	$[\text{kWh}]$	Capacità di carica disponibile al tempo t
Q_{el}	$[\text{kWh}]$	Energia elettrica fornita dal motore
\dot{Q}_{el}	$[\text{kW}]$	Potenza elettrica generata dal motore
$\dot{Q}_{\text{el,u,GE}}$	$\left[\frac{\text{kW}}{\text{unità}} \right]$	Potenza elettrica di una singola unità di cui si compone il GE
Q_{th}	$[\text{kWh}]$	Energia termica fornita dal motore
\dot{Q}_{th}	$[\text{kW}]$	Potenza termica fornita dalla combustione
$Q_{UPS,\text{min}}$	$[\text{kWh}]$	Capacità di carica minima
$Q_{UPS,\text{MAX}}$	$[\text{kWh}]$	Capacità di carica massima
R_f	$[\text{€}]$	Ricavo componente fissa
R_g	$\left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right]$	Ricavo operativo giornaliero

R_{rif}	$\left[\frac{\text{€}}{\text{giorno}} \right]$	Ricavo di riferimento
RACE		Research and Development in Advanced Communications Technologies
RAT		Regolatore Automatico di Tensione
RIPEMD		RACE Integrity Primitives Evaluation Message Digest
RRT		Regolatore Regionale di Tensione
RUC		Registro Unità di Consumo
RUP		Responsabile Unico del Procedimento
RTN		Rete di Trasmissione Nazionale
SEN		Sistema Elettrico Nazionale
SART		Sistema Autonomo per la Regolazione della Tensione
SHA		Secure Hash Algorithm
SPV		Simplified Payment Verification
SOC	[%]	State of Charge
$\overline{\text{SOC}}_a$	[%]	State of Charge media annua
$\overline{\text{SOC}}_{\text{reg}}$	[%]	State of Charge media per una giornata di regolazione
TA		Trasformatore di corrente
TIDE		Testo Integrato del Dispacciamento Elettrico
TV		Trasformatore di tensione
TERNA		Terna s.p.a.
t_{reg}	[h]	Durata singolo intervento di regolazione
$t_{\text{reg,GE}}$	[h]	Durata singolo intervento di regolazione del Gruppo Elettrogeno
UC		Unità di Consumo
UdD		Utenti del Dispacciamento
UP		Unità di Produzione
UPMC		Unità Periferica di Monitoraggio Carico
UPMG		Unità Periferica di Monitoraggio Generazione
UPR		Unità di Produzione Rilevanti
UPS		Uninterruptible Power Supply
UTC		Universal Time Code

Simbologia

UTXO		Unspent Transaction Outputs
UVA		Unità Virtuali Abilitate
UVAC		Unità Virtuali Abilitate di Consumo
UVAM		Unità Virtuali Abilitate Miste
UVAN		Unità Virtuali Abilitate Nodali
UVAP		Unità Virtuali Abilitate di Produzione
UVRP		Unità per la Verifica della Regolazione Primaria
\dot{V}_{comb}	$\left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]$	Portata volumetrica del combustibile
Δf	[Hz]	Variazione di frequenza
ΔP_e	[W]	Variazione di potenza elettrica
ΔP_s	[W]	Variazione potenza elettrica di scambio tra aree di controllo
$\Delta Q_{\text{UPS}} (t = n)$		Capacità di carica aggiunta al tempo $t = n$
η_c		Rendimento di carica
η_{el}		Rendimento elettrico
η_s	[]	Rendimento di scarica
ρ_{comb}	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	Densità del combustibile
σ_P		Grado di statismo permanentemente

Bibliografia

- [1] TERNA, [Online]. Available: <https://www.terna.it/it-it/sistemelettrico/cos%C3%A8ilsistemelettrico.aspx>.
- [2] [Online]. Available: <https://www.terna.it/it/chisiamo/attivita/rete-elettrica-italiana>.
- [3] G. G. M. Energetici, «mercato elettrico,» [Online]. Available: <http://www.mercatoelettrico.org/it/mercati/mercatoelettrico/MPE.aspx>.
- [4] F. Boffa, «Aste al ribasso? Effetti attesi del (possibile) passaggio all'asta pay as bid,» Macerata, Agosto 2009.
- [5] [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Dispacciamento>.
- [6] TERNA, *Codice di rete. Capitolo 4: regole per il dispacciamento*.
- [7] TERNA, *Revisione configurazione zonale*, 2018.
- [8] TERNA, «Individuazione zone della rete rilevante -Allegato A24-,» Gennaio 2019.
- [9] TERNA, *Partecipazione alla regolazione di frequenza e frequenza-potenza. Allegato A15*, 2008.
- [10] TERNA, «Specifiche tecniche per la verifica e valorizzazione del servizio di regolazione primaria di frequenza -Allegato A 73- Codice di rete».
- [11] GRTN, *Partecipazione alla regolazione di tensione*, 2000.
- [12] GRTN, *Sistema automatico per la regolazione della tensione (SART) per centrali elettriche di produzione*, 2003.
- [13] TERNA, «Piano di riaccensione del sistema elettrico nazionale,» 2006.

Bibliografia

- [14] GRTN, «Piano di difesa del sistema elettrico,» 2000.
- [15] ARERA, «291/2019/I/EFR Stato di utilizzo e di integrazione degli impianti di produzione alimentati dalle fonti rinnovabili e di generazione distribuita - Anno 2018,» 2 Luglio 2019.
- [16] ARERA, «428/2018/I/EFR Stato di utilizzo e di integrazione degli impianti di produzione alimentati dalle fonti rinnovabili Anno 20117,» 2 agosto 2018.
- [17] [Online]. Available: <http://www.rinnovabili.it/energia/tide-sistema-elettrico/>.
- [18] ARERA, «Testo Integrato del Dispacciamento Elettrico (TIDE) - orientamenti complessivi -,» 23 Luglio 2019.
- [19] ARERA, «Testo coordinato delle integrazioni e modifiche apportate con le deliberazioni 372/2017/R/EEL e 422/2018/R/EEL,» in *Deliberazione 300/2017/R/EEL*.
- [20] TERNA, «Regolamento MSD recante le modalità per la creazione, qualificazione e gestione di UVAP».
- [21] TERNA, *Partecipazione della domanda al mercato per il servizio di dispacciamento*, 2017.
- [22] TERNA, «Procedura approvvigionamento a termine risorse di dispacciamento per UVAC - Riepilogo capacità assegnata».
- [23] Digital Gold Institute, «Bitcoin and Blockchain Technology,» in *An Introduction*.
- [24] A. M. Antonopoulos, «Capitolo 1,» in *Mastering Bitcoin*.
- [25] A. M. Antonopoulos, «Capitolo 8,» in *Mastering Bitcoin*.
- [26] A. M. Antonopoulos, «Capitolo 6,» in *Mastering Bitcoing*.
- [27] [Online]. Available: bitnodes.earn.com .

- [28] F. M. Ametrano, «Bitcoin and Blockchain Technology,» in *Blockchain, Mining and Distributed Consensues*, 2019.
- [29] A. M. Antonopoulos, «Capitolo 2,» in *Mastering Bitcoin*.
- [30] A. M. Antonopoulos, «Capitolo 7,» in *Mastering Bitcoin*.
- [31] [Online]. Available: <https://medium.com/all-things-ledger/bitcoins-implementation-of-blockchain-2be713f662c2>.
- [32] [Online]. Available: <https://bitcoin.org/en/developer-reference#block-headers>.
- [33] [Online]. Available: <https://learnmeabitcoin.com/browser/block/bits/1d00ffff>.
- [34] [Online]. Available: <https://bitcoin.stackexchange.com/questions/79065/how-nonce-and-difficulty-work>.
- [35] [Online]. Available: <https://learnmeabitcoin.com/glossary/block-Hash>.
- [36] A. M. Antonopoulos, «Capitolo 4,» in *Mastering Bitcoing*.
- [37] 23 05 2015. [Online]. Available: <http://www.okpedia.it/cpu>.
- [38] [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Graphics_processing_unit.
- [39] [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Field_Programmable_Gate_Array.
- [40] [Online]. Available: <https://biomine.it/it/minare-in-italia/>.
- [41] [Online]. Available: <https://99bitcoins.com/bitcoin-mining/pools/>.
- [42] [Online]. Available: <https://slushpool.com/help/reward-system/?c=btc>.
- [43] [Online]. Available: <https://btc.com/stats/diff>.
- [44] [Online]. Available: <https://www.meteofinanza.com/mining-pool-cosa-sono-pro-contro/>.
- [45] [Online]. Available: <https://www.blockchain.com/it/charts>.

Bibliografia

- [46] [Online]. Available: <https://bitcoin.org/en/glossary/difficulty>.
- [47] [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Moore.
- [48] *Prisma magazine* (pag. 14-25), n. Ottobre, pp. 14-25, 2018.
- [49] CoinShares Research, «The Bitcoin mining network: trends, average creation costs, electricity consumption and sources,» Giugno 2019.
- [50] F. M. Ametrano, «Bitcoin: oro digitale per nuovi standard monetari,» 2018.
- [51] [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Gruppo_di_continuit%C3%A0.
- [52] G. Defendi, «milanofinanza,» 28 gennaio 2010. [Online]. Available: <https://www.milanofinanza.it/news/le-tre-fasi-cicliche-dei-mercati-finanziari-201207191612492042>.
- [53] [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ZSnAUHTyksY>.
- [54] [Online]. Available: https://shop.bitmain.com/promote/antminer_s9i_asic_bitcoin_miner/specification.
- [55] [Online]. Available: <https://en.bitcoin.it/wiki/Difficulty>.
- [56] Cambridge Centre for Alternative Finance, [Online]. Available: <https://www.cbeci.org/methodology/>.
- [57] [Online]. Available: <https://www.cambioeuro.it/cambio-storico-dollaro/>.
- [58] «<https://www.asicminervalue.com/>,» [Online].
- [59] [Online]. Available: <https://support.pro.coinbase.com/customer/portal/articles/2945310>.
- [60] Bitmain Technologies Holding Company, «Application Proof of Bitmain,» 2018.
- [61] R. P. C. Belady, *Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCiE*, 2007.

- [62] Uptime Institute, «2019 Data Center Industry Survey».
- [63] U. M., *Power Usage Effectiveness Metrics to Measure Efficiency and Performance of Data Center*, 2014.
- [64] Google, [Online]. Available:
<https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/how/>.
- [65] Wikipedia, [Online]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Server_immersion_cooling.
- [66] IG, [Online]. Available: <https://www.ig.com/it/breakout-tecniche-operative>.
- [67] RSE e Politecnico di Milano, «Mercato elettrico: analisi prezzi e quantità,» in *Partecipazione della domanda flessibile al mercato del servizio di dispacciamento*, 2018.
- [68] Wikipedia, [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Distribuzione_normale.
- [69] Wikipedia, [Online]. Available:
https://it.wikipedia.org/wiki/Funzione_di_ripartizione_della_variabile_casuale_normale.
- [70] [Online]. Available:
https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries.
- [71] RSE e Politecnico di Milano, «Valutazione economica: alcuni casi di business,» in *Partecipazione della domanda flessibile al mercato del servizio di dispacciamento*, 2018.
- [72] [Online]. Available: <http://www.kataclima.com/2019-02-12-tabella-parametri-nazionali-per-il-calcolo-delle-emissioni-2018/>.
- [73] [Online]. Available: <https://www.manelservice.com/shop/164-gruppi-elettrogeni-generatori-di-corrente/gruppi-elettrogeni-terrestri>.

Bibliografia

- [74] Schneider Electric, [Online]. Available:
<https://www.se.com/it/it/work/insights/reliability-considerations-in-simple-parallelizing-applications.jsp>.
- [75] Ministero dello sviluppo economico, [Online]. Available:
https://dgsaie.mise.gov.it/prezzi_carburanti_mensili.php?pid=3.
- [76] [Online]. Available:
http://www.architettiroma.it/fpdb/file/2015/03/Scelta_del_Tasso_di_attualizzazione.pdf.
- [77] RSE, «Partecipazione della domanda flessibile al mercato del servizio di dispacciamento,» in *L'aggregazione delle risorse di flessibilità*, Milano, 2018.
- [78] [Online]. Available: <https://www.ilbitcoin.news/la-transazione-bitcoin/>.
- [79] IG, [Online]. Available: <https://www.ig.com/it/glossario-trading/definizione-di-volume>.