

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

**Gestione dell'energia e efficienza energetica del sistema
di generazione dei vettori energetici di uno stabilimento
automobilistico con il metodo Input-Output**



Relatore

Prof. Salvatore Mancò

Candidato

Camilla Fogacci

Aprile 2018

Grazie ai miei genitori, il mio esempio in tutto, le persone che stimo di più al mondo e che spero di rendere orgogliose ogni giorno.

Grazie a mio fratello, il mio esempio di forza, intelligenza e amore.

Grazie alle mie amiche da una vita, sempre con me nonostante la distanza.

Grazie ad Andrea, la mia forza, capace di rendere ogni sogno possibile.

ABSTRACT	1
1 INTRODUZIONE	3
2 LETTERATURA	7
2.1 Modello di Leontief	7
2.1.1 Tavola Input Output	8
2.1.2 Modello chiuso	10
2.1.3 Modello aperto	11
2.2 Utilità del modello	14
2.3 Il modello in ambito energetico	15
3 CASE STUDY	17
3.1 Impianti di produzione e distribuzione del calore	18
3.1.1 Generazione di vapore	20
3.1.2 Produzione di acqua surriscaldata	20
3.2 Impianti di produzione e distribuzione di aria compressa	20
3.3 Impianti di produzione e distribuzione delle acque primarie	24
3.4 Impianto di trattamento delle acque reflue	25
3.4.1 Linea acque	26
3.4.2 Linea fanghi	28
3.5 Impianto di depurazione delle acque di carrozzeria	28
3.6 Impianto di rottura delle emulsioni oleose	29
3.6.1 Trattamento di rottura delle emulsioni	30
3.6.2 Trattamento fisico-chimico di flocculazione	31
3.6.3 Trattamento biologico nitro-denitro	31
3.7 Impianti di produzione e distribuzione di energia frigorifera	31
3.8 Impianti di produzione e distribuzione dell'energia elettrica	33
3.9 Schematizzazione dello stabilimento	34
4 CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA	37

4.1	Consumi energetici	38
4.1.1	Consumi di energia elettrica	41
4.1.2	Consumi di gas naturale	45
4.1.3	Consumi di acqua industriale	46
4.1.4	Consumi di aria compressa	49
4.2	Baseline dei consumi	49
4.2.1	Regressione lineare	49
4.2.2	Modello CuSum	53
4.2.3	Elaborazione dei dati relativi al consumo di energia elettrica	55
4.2.4	Elaborazione dei dati relativi al consumo di gas naturale	67
4.2.5	Elaborazione dei dati relativi al consumo di acqua industriale	70
4.2.6	Elaborazione dei dati relativi al consumo di aria compressa	75
4.2.7	Perdite di trasformazione dell'energia elettrica	75
4.3	Fase di monitoraggio	78
4.3.1	Monitoraggio dei consumi di energia elettrica	78
4.3.2	Monitoraggio dei consumi di gas naturale	82
4.3.3	Monitoraggio dei consumi di acqua industriale	83
5	ELABORAZIONE DEL MODELLO INPUT-OUTPUT	84
5.1	Definizione del sistema di generazione e dei flussi energetici	85
5.2	Costruzione della matrice Input-Output	89
5.2.1	Definizione dei consumi specifici	92
5.3	Verifica della validità del modello	94
5.3.1	Analisi dei risultati	96
6	VALUTAZIONE DI INTERVENTI DI OTTIMIZZAZIONE	99
6.1	Analisi di significatività dei consumi	99
6.2	Interventi negli impianti di produzione di aria compressa	102
6.2.1	Sostituzione di un compressore nel reparto Carrozzeria	102
6.2.2	Sostituzione di un compressore nel reparto Presse	103
6.3	Sostituzione di uno scambiatore di calore	104
6.4	Pulizia dei gruppi frigoriferi	106
6.5	Modello Input-Output per il calcolo del risparmio energetico	107
7	GESTIONE ECONOMICA DELLO STABILIMENTO	111
7.1	Budget standard	111
7.1.1	Costi fissi	112

7.1.2	Costi variabili	114
7.2	Analisi degli scostamenti	118
7.2.1	Budget flessibilizzato	119
7.2.2	Consuntivo	121
7.2.3	Componenti di scostamento	123
8	CONCLUSIONI	131
	BIBLIOGRAFIA	135

Abstract

Il presente elaborato è il risultato dello studio di un modello di natura economica implementato ai fini della gestione energetica di uno stabilimento industriale complesso. In un'epoca di continuo incremento della domanda energetica mondiale, la gestione delle risorse e l'uso razionale dell'energia hanno acquisito un ruolo fondamentale soprattutto in ambito industriale. L'obiettivo della tesi è quello di fornire un metodo adatto al monitoraggio e al controllo dei flussi energetici, primari e secondari, del sistema di generazione dei vettori energetici per un'azienda automobilistica di Torino. A tal fine è stato rielaborato il modello Input-Output del Nobel dell'economia Leontief: esso si basa sulla tavola dei coefficienti tecnici che, una volta creata, si presta alla descrizione minuziosa del sistema in analisi permettendone il continuo controllo. Successivamente allo studio del metodo, esso è stato applicato allo stabilimento in analisi, dettagliatamente descritto nell'elaborato, verificandone l'effettiva validità attraverso alcune prove. Confermata l'efficacia del modello in riferimento a diverse tipologie di vettori e differenti intervalli temporali, la tavola Input-Output è stata utilizzata per la valutazione di alcuni interventi di ottimizzazione sul sistema e per la predisposizione del budget dei costi energetici ed economici per il soddisfacimento della domanda finale di energia.

1 Introduzione

I nuovi scenari economici, industriali, sociali ed ambientali che il mondo sta fronteggiando, richiederanno, nei prossimi decenni, un impegno continuo nella riduzione dell'uso di risorse naturali e materie prime, esattamente nel momento in cui la richiesta sarà più alta in termini di beni e produttività. In questo scenario, l'uso efficiente dell'energia diventa certamente una priorità.

Con particolare riferimento ai processi industriali, l'obiettivo comune è quello di realizzare gli stessi prodotti e servizi con un minor consumo di energia primaria. Negli ultimi anni, gli interventi nel settore industriale sono stati fortemente sollecitati da Decreti Legislativi e obiettivi comuni. A tal proposito il Decreto Legislativo del 4 luglio 2014 stabilisce un quadro di misure per la promozione ed il miglioramento dell'efficienza energetica a concorrenza del conseguimento dell'obiettivo nazionale di risparmio energetico che prevede una riduzione, entro il 2020, di 20 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio dei consumi di energia primaria, corrispondenti a 15,5 tep di energia finale. Inoltre, le imprese a forte consumo di energia sono tenute ad eseguire diagnosi energetiche indipendentemente dalla loro dimensione e a dare progressiva attuazione ad interventi di efficienza individuati dalle diagnosi stesse o, in alternativa, ad adottare sistemi di gestione conformi alla norma ISO 50001. L'identificazione di eventuali interventi di razionalizzazione energetica, infatti, è conseguente alla costruzione di un sistema di gestione che permetta di individuare e monitorare tutte le fonti di consumo e che consenta di prevederne l'evoluzione: a livello aziendale ed industriale nasce dunque l'esigenza di disporre di metodi gestionali che inquadrino la realtà produttiva in modo completo al fine di semplificare e rendere più immediato il processo di miglioramento e ottimizzazione. [1-4] La norma ISO 50001, per esempio, propone due concetti fondamentali per facilitare la misura ed il monitoraggio delle prestazioni energetiche: l'EnPI, energy performance indicator, e l'EnB, energy baseline. Questi indicatori permettono rispettivamente la quantificazione dei risultati di efficienza energetica ed il successivo confronto con valori di riferimento, o baseline, per apprezzare i reali miglioramenti. In questo elaborato verrà utilizzata la stessa strategia: il punto chiave sarà l'individuazione di caratteristiche di consumo di riferimento per il monitoraggio e la previsione di eventuali scostamenti migliorativi o peggiorativi. [5]

Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni che ha messo in gioco strumenti di misura, previsione e controllo estremamente sofisticati, ha anche trasformato il settore industriale in realtà sempre più complesse, caratterizzate da risorse e prodotti di vario tipo e impianti basati su diversi principi di

funzionamento. Tale aspetto rende necessaria l'adozione di modelli strutturati che permettano una definizione accurata ed un controllo puntuale ed immediato dell'efficienza energetica anche nel caso di sistemi produttivi complessi. È da considerare, infatti, che lo scopo di un sistema di gestione dell'energia sia quello di controllare e valutare l'efficienza totale del sistema: per questo diventa necessaria una strategia che consenta di combinare l'efficienza dei singoli processi a concorrenza di un unico risultato complessivo.

Questo elaborato ha lo scopo di analizzare, verificare ed applicare un metodo che si presti in modo globale e puntuale alla descrizione di un sistema caratterizzato da numerose interrelazioni tra gli elementi che lo compongono: tale modello è detto *Input-Output*. Il modello citato, ideato dal Nobel Leontief, nasce per il monitoraggio e la gestione dei flussi monetari di un sistema economico: l'idea da cui nasce questo elaborato, è quella di studiare la possibilità di applicare il metodo Input-Output ad uno stabilimento produttivo indagandone, invece, i flussi energetici.

Nello specifico si vuole studiare il metodo Input-Output per la rappresentazione di un sistema energetico complesso nella sua interezza attraverso una tavola i cui elementi individuino i consumi specifici di ciascun processo: costruita la matrice e verificata la sua validità, essa può divenire uno strumento di gestione dello stabilimento sotto diversi punti di vista, alcuni dei quali saranno approfonditi in questo lavoro.

L'analisi è stata svolta relativamente ad uno stabilimento reale, ritenuto particolarmente adatto allo studio in quanto caratterizzato da numerosi impianti di diverso tipo e correlati da flussi energetici di natura profondamente differente. In seguito ad un'analisi approfondita, presentata nel capitolo 2, in riferimento alle conoscenze presenti in letteratura a proposito del modello Input-Output, del suo utilizzo e delle sue peculiarità, nel capitolo 3 è descritto dettagliatamente lo stabilimento oggetto di studio. Come sarà chiarito in seguito, infatti, la costruzione della tavola è resa possibile solamente a valle dell'identificazione di tutti i componenti del sistema e di ciascun flusso e interrelazione presente tra di essi. Gli elementi della matrice rappresentano i consumi specifici di ognuno dei processi produttivi che avvengono nello stabilimento: essi sono stati ricavati, nel capitolo 4, dalla rielaborazione dei dati storici attraverso metodi statistici, identificando il periodo di produzione più stabile e recente nell'ambito dell'arco temporale analizzato; in seguito sono state individuate caratteristiche lineari che descrivessero al meglio i processi di consumo. Nel corso del capitolo 5 è descritta la costruzione della matrice e se ne verifica la validità. Negli ultimi due capitoli si riportano utilizzi pratici del modello: nel capitolo 6 la tavola Input-Output è utilizzata per la valutazione di alcuni interventi di ottimizzazione energetica previsti per diversi impianti; nel capitolo 7, essa viene sfruttata durante la costruzione di un business plan per la previsione di consumi energetici ed economici permettendo una visione globale e puntuale delle differenti parti del sistema di generazione.

Il modello Input-Output viene dunque, studiato e verificato per un'applicazione innovativa con l'obiettivo di ottenere uno strumento di gestione energetica che possa essere utilizzato in uno stabilimento estremamente complesso come riferimento durante il monitoraggio ed il controllo dei consumi, ma anche come metodo di previsione e valutazione in ambito decisionale.

2 Letteratura

Si devono all'economista russo Wassily Leontief l'elaborazione e le prime applicazioni dell'analisi Input-Output. Leontief riprese l'intuizione di Quesnay, riassunta nel "Tableau économique", che per primo approfondì l'economia come un insieme di settori, fortemente dipendenti dai settori produttivi e dalle relazioni economiche esistenti tra le classi sociali, e generò due tavole delle transizioni a 10 settori produttivi per l'economia statunitense, raccolte nel lavoro *"La Struttura dell'economia americana: 1919-29"*. La prima tavola Input-Output delle transizioni per l'economia italiana fu costruita dalla Mutual Security Agency nel 1950 e aggiornata dall'ISCO nel 1953. Nel decennio successivo l'ISTAT elaborò tavole delle transazioni riferite a 77 settori produttivi, fino all'entrata ufficiale della tavola nella contabilità nazionale per tutti i paesi dell'Unione Europea nel 1970. [6-8]

2.1 Modello di Leontief

Leontief partì dall'assunzione che la realtà economica deve essere interpretata in tutta la sua struttura, interezza e complessità, costituita da tecnologie, risorse primarie ed altri fattori, mediante un modello che consenta una descrizione delle relazioni tra le quantità di beni prodotti e consumati: tale strumento è la tavola Input-Output. La tavola Input-Output nasce, dunque, come strumento conoscitivo e di analisi delle interrelazioni fra le differenti parti di un'economia nazionale definite attraverso produzioni, investimenti, redditi e prezzi: la tavola permette l'analisi dei meccanismi alla base della produzione dei diversi settori operanti nel sistema economico considerato.

Il modello lineare di produzione coinvolge *beni e imprese*: in particolare, ogni impresa, nella sua attività produttiva, necessita di alcune risorse per produrne altre, cioè esiste una domanda intermedia; la produzione comunque rimane finalizzata a soddisfare una domanda esterna al sistema produttivo, quella finale.

Nell'approccio Input-Output la descrizione delle interdipendenze intermedie fra settori produttivi ha un ruolo fondamentale anche per l'analisi di risorse primarie e impieghi finali. Il motivo della spiccata attenzione prestata ai livelli intermedi è spiegato dall'ipotesi implicita che le performances dell'intero sistema economico dipendano in misura prevalente dai rapporti tra le unità produttive. [6]

Il modello lineare di Leontief si basa su alcune ipotesi semplificatrici:

- L'economica nazionale è costituita da imprese interagenti tra loro;
- Ogni impresa produce e acquista prodotti da altri settori del sistema economico considerato;
- Ogni impresa vende i propri prodotti alle altre e ad eventuali consumatori e, per questo il livello di produzione deve essere sufficiente a soddisfare la domanda intermedia delle imprese e la domanda finale dei consumatori.

2.1.1 Tavola Input Output

La tavola Input-Output è una matrice a doppia entrata costituita da tre sottomatrici:

Settori di origine	Settori di utilizzazione					Settori finali				Impieghi
	1	2	j	n	tot	1	2	s	tot.	
1	x_{11}	x_{12}	x_{1j}	x_{1n}	$x_{1.}$	z_{11}	z_{12}	z_{1s}	$z_{1.}$	X_1
2	x_{21}	x_{22}	x_{2j}	x_{2n}	$x_{2.}$	z_{21}	z_{22}	z_{2s}	$z_{2.}$	X_2
i	x_{i1}	x_{i2}	x_{ij}	x_{in}	$x_{i.}$	z_{i1}	z_{i2}	z_{is}	$z_{i.}$	X_i
n	x_{n1}	x_{n2}	x_{nj}	x_{nn}	$x_{n.}$	z_{n1}	z_{n2}	z_{ns}	$z_{n.}$	X_n
totale	$x_{.1}$	$x_{.2}$	$x_{.j}$	$x_{.n}$	$x_{..}$	$z_{.1}$	$z_{.2}$	$z_{.s}$	$z_{..}$	$X_{..}$

Settori primari					
1	y_{11}	y_{12}	y_{1j}	y_{1n}	$y_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	y_{2j}	y_{2n}	$y_{2.}$
r	y_{r1}	y_{r2}	y_{rj}	y_{rn}	$y_{r.}$
totale	Y_1	Y_2	Y_j	Y_n	$Y_{..}$

Risorse totali	X_1	X_2	X_j	X_n	$X_{..}$
----------------	-------	-------	-------	-------	----------

Figura 1 Rappresentazione generale della tavola Input Output

- A. La sottomatrice denominata *tavola degli impieghi intermedi*, è una matrice quadrata che descrive tutti i flussi intermedi tra i settori di produzione, prima che l'output finale sia reso disponibile;

Settori di origine	Settori di utilizzazione				
	1	2	j	n	tot
1	x_{11}	x_{12}	x_{1j}	x_{1n}	$x_{1.}$
2	x_{21}	x_{22}	x_{2j}	x_{2n}	$x_{2.}$
i	x_{i1}	x_{i2}	x_{ij}	x_{in}	$x_{i.}$
n	x_{n1}	x_{n2}	x_{nj}	x_{nn}	$x_{n.}$
totale	$x_{.1}$	$x_{.2}$	$x_{.j}$	$x_{.n}$	$x_{..}$

Figura 2 Tavola degli utilizzi intermedi

- B. La sottomatrice degli impieghi primari evidenzia il valore aggiunto e le sue componenti: produzioni, importazioni ed il totale delle risorse dei settori produttivi;

Settori primari	1	2	j	n	tot.
1	y_{11}	y_{12}	y_{1j}	y_{1n}	$y_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	y_{2j}	y_{2n}	$y_{2.}$
r	y_{r1}	y_{r2}	y_{rj}	y_{rn}	$y_{r...}$
totale	Y_1	Y_2	Y_j	Y_n	Y

Figura 3 Tavola degli impieghi primari

- C. La sottomatrice degli impieghi finali riporta i beni e i servizi che dai settori di origine affluiscono alla domanda finale.

	Settori finali				Im pie ghi
	1	2	s	tot.	
1	z_{11}	z_{12}	z_{1s}	$z_{1.}$	X_1
2	z_{21}	z_{22}	z_{2s}	$z_{2.}$	X_2
i	z_{i1}	z_{i2}	z_{is}	$z_{i..}$	X_i
n	z_{n1}	z_{n2}	z_{ns}	$z_{n..}$	X_n
totale	z_1	z_2	z_s	z	X

Figura 4 Tavola degli impieghi finali

La lettura della matrice Input-Output nel senso delle colonne consente di analizzare, per ciascun settore, la struttura dei costi di produzione: i totali di ogni colonna rappresentano gli acquisti effettuati dal settore corrispondente. Più precisamente $\sum_i x_{ij} + Y_j = X_j$, dove il generico flusso intermedio x_{ij} è originato dai sistemi produttivi i e assorbito dal settore j considerato, Y_j è il valore aggiunto del j -esimo settore e comprende ammortamenti, costi del personale e altre voci di costo; X_j rappresenta, infine, il costo totale del settore j . Leggendo la matrice nel senso delle righe, invece, è possibile conoscere come la produzione del generico settore i viene assorbita da parte dei settori produttivi, per usi intermedi, e da parte dei settori finali, per usi finali. Cioè, $\sum_j x_{ij} + Z_i = X_i$, dove il generico flusso intermedio x_{ij} è originato dal sistema produttivo del settore i -esimo e assorbito dai differenti settori j , mentre Z_i è la domanda finale da sopperire. Tramite questa equazione si analizza la produzione del generico settore i di origine secondo la destinazione della stessa. [6,9,10]

2.1.2 Modello chiuso

Il modello chiuso rappresenta la formulazione piu' semplice del metodo di Leontief. L'obiettivo del modello chiuso è l'analisi dei flussi di beni e servizi tra tutti i settori di un'economia in un determinato periodo temporale, descritto dal seguente sistema lineare:

[illegible]

Dove n rappresenta il numero dei settori, i rappresenta il generico settore di origine e j il generico settore di destinazione. L'insieme di queste equazioni esprime l'equilibrio tra la domanda e l'offerta di ogni merce, descrivendo l'esatta uguaglianza tra la produzione di ogni industria X_i e la somma delle quantità della merce i consumata da tutte le industrie j ; inoltre, è immediato notare che le righe del sistema suddetto rispecchino le righe della figura 1.

Il sistema seguente, invece, è costituito dalle equazioni di prezzo: la lettura verticale della tavola input-output, infatti, permette di stabilire una prima relazione analitica costituita da tutti gli elementi di costo che concorrono a formare il valore della produzione. La colonna generica j comprende tutti i costi affrontati dal settore corrispondente per rifornirsi di beni e servizi presso gli altri settori produttivi.

[illegible]

Dove $p_1, p_2, \dots, p_n$ rappresentano i prezzi dei beni prodotti.

Per potere operare sul sistema definito e rappresentare lo stato di produzione del sistema economico in analisi, la tavola degli impieghi intermedi viene trasformata in *matrice dei coefficienti tecnici*. Nell'analisi Input-Output è fondamentale l'ipotesi stabilita per la determinazione della funzione di produzione che lega il generico input x_{ij} e la produzione X_j del settore stesso. Per la determinazione dei coefficienti tecnici, si stabilisce l'ipotesi di tecnologia lineare, cioè in ciascuna attività produttiva la quantità di input è strettamente proporzionale al volume dell'output ottenibile. I coefficienti tecnici a_{ij} esprimono, dunque, la quantità di input del settore i necessari per realizzare un'unità di output del settore j :

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j} \quad (2.3)$$

Utilizzando i coefficienti tecnici a_{ij} , il modello di Leontief può essere descritto dal seguente sistema lineare, in cui le cui equazioni esprimono la domanda totale degli n produttori:

[illegible]

Il limite del modello chiuso consiste nella possibilità di descrivere solamente un'economia statica, che riproduce costantemente se stessa producendo e consumando sempre le stesse quantità. Più completo e versatile è il modello aperto, descritto in maniera approfondita nel prossimo paragrafo. [6,10,12]

2.1.3 Modello aperto

Ogni attività, per raggiungere il suo obiettivo produttivo, assorbe risorse, gli input, e allo stesso tempo rilascia output. Considerando la tavola degli impieghi intermedi, e indicando con X_i il volume della produzione del settore i , si faccia riferimento al seguente sistema di equazioni:

[illegible]

Sfruttando, come precedentemente, la definizione dei coefficienti tecnici a_{ij} (2.3), il sistema di equazioni definito per il modello aperto diventa:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n + d_1 \\ X_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2j}x_j + \dots + a_{2n}x_n + d_2 \\ \vdots \\ X_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ij}x_j + \dots + a_{in}x_n + d_i \\ \vdots \\ X_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nj}x_j + \dots + a_{nn}x_n + d_n \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\begin{array}{l} X_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n + d_1 \\ X_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2j}x_j + \dots + a_{2n}x_n + d_2 \\ \vdots \\ X_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ij}x_j + \dots + a_{in}x_n + d_i \\ \vdots \\ X_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nj}x_j + \dots + a_{nn}x_n + d_n \end{array}$$
$$X = AX + D \tag{2.7}$$
$$(I - A)X = D \tag{2.8}$$
$$\left(\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) - \left(\begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} \dots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} \dots a_{2n} \\ \dots & \dots \dots \dots \\ a_{n1} & a_{n2} \dots a_{nn} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_n \end{array} \right) \quad (2.9)$$

La risoluzione del sistema risulta possibile attraverso l'inversione del termine $(I-A)$, cioè esprimendo il vettore della produzione in funzione della domanda finale; quindi, se

$\det(I - A) \neq 0$, esiste la sua matrice inversa e si ricava:

$$X = (I - A)^{-1}D \quad (2.10)$$

Dove $(I - A)^{-1}$ è detta *matrice inversa di Leontief* ed è tale che, moltiplicata per il vettore della domanda finale fornisca un'unica soluzione X contenente le quantità produttive necessarie. L'ultima equazione permette di esprimere il generico elemento del vettore della produzione come combinazione lineare degli elementi del vettore della domanda finale e i coefficienti di tale combinazione sono i termini della riga della matrice inversa relativa al settore a cui la produzione si riferisce. L'equazione risultante rende possibile la determinazione delle soluzioni al variare del vettore D della domanda finale.

È necessario ricordare che, per la risoluzione del sistema, devono essere soddisfatte le seguenti condizioni: $a_{ij} \geq 0$ e $x_i \geq 0$, cioè i coefficienti delle incognite e le soluzioni devono essere non negativi.

Il valore della produzione del settore i sarà, a sua volta:

$$X_i = x_i * p_i \quad (2.11)$$

In cui X_i è la quantità totale di bene i prodotta nell'unità di tempo e p_i il prezzo con cui viene scambiato.

Il coefficiente di spesa, che in aggiunta al coefficiente tecnico ingloba il prezzo relativo del prodotto, è definito nel modo seguente:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} * p_i}{x_j * p_j} = a_{ij} * \frac{p_i}{p_j} \quad (2.12)$$

Il coefficiente di spesa indica quante unità monetarie del bene i sono necessarie per produrre un'unità monetaria del bene j . In altri termini, i flussi, quando sono delle quantità, risultano espressi in unità fisiche i cui coefficienti diretti sono chiamati coefficienti tecnici; quando i flussi sono espressi in unità monetarie sono, invece, rappresentati da coefficienti diretti di spesa. Tra i due tipi di coefficienti diretti intercorre una relazione che consente di passare dall'uno all'altro tipo: in una matrice i cui flussi sono espressi in unità monetarie il valore di un bene o servizio può essere ottenuto come prodotto di quantità per prezzo pagato nella transazione. [6,10,12]

2.2 Utilità del modello

Il modello Input-Output, nonostante nasca come schema di contabilità economica, trova diverse applicazioni nelle analisi strutturali e previsionali, in particolare può essere integrato in modelli economici ai fini di:

- analisi della produzione, delle strutture dei costi e della produttività;
- analisi dei prezzi;
- analisi della struttura degli investimenti, dei consumi finali e delle esportazioni;
- analisi della relazione fra produzione interna e ambiente;
- analisi delle importazioni di energia;
- analisi dell'impatto di nuove tecnologie.

Nel caso dell'analisi strutturale, la tavola Input-Output permette il confronto tra diverse strutture produttive consentendo di evidenziarne i caratteri economici fondamentali: questo studio è reso possibile dall'analisi dei legami esistenti tra i diversi settori che, senza un modello completo ed intrecciato come questo, non sarebbe ugualmente efficace.

Uno degli aspetti sicuramente più vantaggiosi del modello di Leontief, comunque, è l'utilizzo come strumento di previsione. Nella definizione delle strategie di politica economica e di produzione, infatti, risulta utile la possibilità di previsione degli effetti sul sistema produttivo provocati da ipotesi alternative di azioni e linee di intervento. Il modello Input-Output diventa così, non solo un metodo di previsione, ma anche strumento di decisione e valutazione di investimenti e cambiamenti. Ipotizzando la previsione dei consumi futuri e disponendo della matrice dei coefficienti tecnici, la soluzione del sistema permette di formulare una previsione delle quantità da produrre in ciascun settore. Inoltre, al variare della domanda da parte degli utilizzatori finali, il modello permette di analizzare quali mutamenti si verifichino nei diversi settori produttivi.

I molteplici vantaggi relativi all'utilizzo del modello avrebbero sicuramente un riscontro positivo anche in altri ambiti. A tal proposito, nell'ultimo quindicennio si è assistito allo sviluppo e alla rivisitazione di modelli econometrici che consentono di studiare, partendo da teorie economiche, l'andamento delle variabili del mondo reale. Da qui nasce l'idea di estendere il modello di Leontief all'ambito energetico con l'obiettivo di analizzare i vettori energetici consumati e prodotti: allo stesso modo in cui l'analisi Input-Output classica esamina i movimenti di denaro tra i settori dell'economia di un paese, è possibile pensare ad un'applicazione energetica che si focalizzi sui flussi di energia tra i settori di uno stabilimento industriale.

2.3 Il modello in ambito energetico

Come accennato, è evidente che l'utilità del modello Input-Output possa ricoprire un ruolo di estremo interesse anche in ambito energetico: recenti studi hanno fornito significativi strumenti per permetterne l'applicazione anche in questo ambito.

L'idea risiede nella costruzione di una matrice che descriva i flussi energetici di un sistema nella sua interezza. Mentre gli elementi della tavola di Leontief hanno natura monetaria, l'innovazione di questa applicazione prevede l'utilizzo di indicatori dei consumi di diversi componenti energetici in analisi. In particolare, è stato spiegato che la matrice Input-Output descrive la relazione esistente tra consumo e produzione: nei paragrafi precedenti è stato definito il generico elemento a_{ij} della tavola come quantità di input del settore i necessari alla realizzazione di un'unità di output del settore j . In ambito energetico tale elemento è detto *consumo specifico* e misura la quantità di energia primaria per la produzione di un'unità di volume produttivo finale:

$$q = \frac{E_{in}}{V} \quad (2.13)$$

Risulta che lo step fondamentale per la costruzione della tavola sia la determinazione dei consumi specifici che descrivono ogni processo oggetto di studio. A tal proposito, il primo stadio per l'ottenimento della matrice prevede una dettagliata caratterizzazione energetica di tutti i processi del sistema in oggetto, identificandone, al suo interno, il sistema di generazione e quello di utilizzazione. In questo elaborato l'analisi riguarderà il sistema di generazione, per le motivazioni descritte in seguito. La caratterizzazione energetica permette, attraverso metodi statistici, l'individuazione di correlazioni auspicabilmente lineari tra i volumi produttivi e i consumi. Coerentemente con la disponibilità di dati storici relativi ad un determinato arco temporale, è necessario identificare il periodo più recente e stabile rispetto al quale costruire la caratteristica dei consumi. In seguito ad alcuni studi in materia, il metodo apparentemente più accurato è risultato essere il CuSum che, tramite carte a somme cumulate, permette l'individuazione di scostamenti anche di piccola entità rispetto al valore centrale: l'obiettivo di questo step primario è la creazione di equazioni di riferimento che descrivano tutti i consumi del sistema. [13] Tali equazioni, come spiegato in dettaglio nel capitolo 4, sono caratterizzate dalla variabile dipendente 'consumo' E_{in} espressa in funzione di una indipendente, energy driver V , opportunamente scelta in riferimento al processo studiato:

$$E_{in} = C_0 + c_1 V \quad (2.14)$$

Risulta utile esprimere la 2.14 in funzione del volume produttivo al fine di ottenere i valori di consumo specifico, definiti dalla 2.13, chiamati q_{ij} . Il sistema 2.6 diventa dunque:

(2.15)

$$E = QE + D \quad (2.16)$$
$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{12} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \cdots & q_{mn} \end{bmatrix}.$$
$$(I - Q)E = D \quad (2.17)$$

(2.18)

$$E = M_q D \quad (2.19)$$

Lo studio dell'innovativa applicazione del metodo all'ambito energetico, è stato svolto in riferimento ad uno stabilimento industriale caratterizzato da impianti di varie tipologie e basato sull'introduzione e produzione di vettori energetici di diverso tipo. In particolare, nel capitolo seguente è presentato lo stabilimento in analisi: è presente una descrizione dettagliata di tutti gli impianti successivamente studiati.

3 Case study

Il modello descritto nel capitolo precedente è stato applicato ad uno stabilimento industriale, che verrà descritto in seguito. Lo scopo del presente capitolo è la descrizione delle caratteristiche principali dello stabilimento posto in analisi, nonché delle attività svolte all'interno dello stesso. Nei paragrafi successivi sarà inquadrato il contesto geografico e termodinamico: l'analisi farà riferimento agli impianti attualmente installati e alla classificazione delle attività produttive svolte. Questo capitolo è quindi il driver della raccolta di dati, che verranno poi utilizzati e computati nei capitoli successivi.

L'Unità Operativa in esame è sita a Torino nel comprensorio di un'azienda del settore automotive a cui fornisce parte dei servomezzi necessari alle officine e ai relativi uffici. L'Unità Operativa oggetto di studio rappresenta il sistema di generazione, mentre l'azienda a cui essa fornisce i vettori energetici prodotti sarà denominata *Cliente*. Tra le due parti vige un accordo contrattuale basato sul modello della regia partecipata dell'energia, che prevede un meccanismo reciproco di incentivazione alla riduzione dei costi: in particolare, la UO assicura la fornitura dei vettori energetici necessari nel rispetto di un livello predefinito di performance. Questo comporta la condivisione dei vantaggi derivanti dalla realizzazione di interventi mirati all'efficienza energetica e l'impegno dei due partners al monitoraggio comune dei servizi energetici e ambientali. Tale accordo segna, dunque, il passaggio da un rapporto di semplice fornitura di servizi ad un vero e proprio contratto di energy performance.

L'area considerata ha un'estensione di 2.000.000 mq e un volume riscaldato di quasi 6.000.000 mc. Al suo interno si snodano 20 chilometri di linee ferroviarie e 11 chilometri di strade sotterranee che collegano i vari capannoni. Inquadramento geografico territoriale di Torino:

- Altezza media sul livello del mare: 239m
- Zona climatica di appartenenza: E



Figura 5 Immagine satellitare del comprensorio

Gli impianti hanno il compito di soddisfare la domanda energetica del Cliente a partire dalla fornitura di calore per il riscaldamento degli uffici direzionali alla predisposizione dei vettori necessari all'attività produttiva dei tre reparti principali: Carrozzeria, Meccanica, Presse. L'analisi sarà particolarmente interessante considerando la vasta varietà di impianti in questione; le principali attività nel sito sono elencate di seguito:

Produzione e distribuzione

- Calore, vapore e acqua surriscaldata;
- Aria compressa e surpressa;
- Acqua refrigerata;
- Acqua demineralizzata.

Distribuzione

- Energia elettrica;
- Acqua per utilizzi industriali;
- Gas naturale.

L'Unità Operativa gestisce anche il riscaldamento e raffrescamento degli ambienti e i trattamenti delle acque. Gli impianti che permettono le attività elencate verranno descritti nei prossimi paragrafi e caratterizzati dal punto di vista energetico ed economico nei capitoli successivi.

3.1 Impianti di produzione e distribuzione del calore

Nel Comprensorio sono presenti due centrali termoelettriche:

- Centrale di Alta Pressione, costituita da un generatore di vapore da 77MW e tre

turboalternatori;

- Centrale di Media Pressione, costituita da cinque generatori di vapore di taglia da 17 a 101MW e tre turboalternatori;



Figura 6 Centrali termiche di alta e media pressione

Le attività di esercizio degli impianti sono dettate dalle richieste di erogazione di calore e vapore tecnologico del Cliente. I generatori di vapore generalmente vengono eserciti in funzionamento automatico, tuttavia occorre tenere presente che, per una gestione ottimale della produzione nel periodo di riscaldamento, le caldaie lavorano spesso in parallelo a pressione costante: quindi una caldaia rimane in funzionamento automatico (modulazione in funzione del carico) e le altre vengono impostate in manuale a pressione del vapore e portata del metano costanti (carico costante).

Le centrali termoelettriche producono il calore necessario al Compensorio sia per gli usi tecnologici sia per il riscaldamento dei fabbricati. Il vapore prodotto dalle caldaie è utilizzato per i seguenti scopi:

- Per il funzionamento dei tre turboalternatori a 10MPa e 505°C della centrale di alta pressione e dei tre turboalternatori di media pressione a 2.3 MPa e 310°C;
- Per alimentare gli scambiatori di calore per la produzione di acqua surriscaldata, previa riduzione di pressione a 250 kPa e temperatura a 180°C;
- Per alimentare la rete verniciatura di stabilimento alla pressione di circa 2.3 MPa con temperatura di circa 310°C al collettore. Il vapore, dopo l'utilizzo, viene rilanciato alla centrale termica sotto forma di condensa;
- Per alimentare le utenze ausiliarie di centrale.

3.1.1 Generazione di vapore

Le caldaie utilizzano come combustibile gas naturale alla pressione di 0.15 MPa derivato dalla rete SNAM e sono alimentate con acqua distillata, per preservare il funzionamento e la durata delle tubazioni, proveniente da SAP, Società Acqua Potabile. Il numero delle caldaie in servizio dipende dalle richieste di calore degli Utenti. Una caldaia deve sempre essere mantenuta come riserva calda per sopperire ad eventuali disservizi.

3.1.2 Produzione di acqua surriscaldata

La produzione di acqua surriscaldata, a 140°C, avviene tramite otto scambiatori di calore collocati in centrale di alta pressione e altri otto collocati in centrale di media pressione; l'acqua surriscaldata prodotta viene inviata ai collettori di distribuzione e da questi vengono alimentate le reti.

L'impianto di produzione e distribuzione acqua surriscaldata è composto da:

- Scambiatori di calore a flussi separati;
- Vasi di espansione collegati ai collettori di ritorno delle reti di distribuzione, che permettono le dilatazioni termiche del fluido;
- Pompe di circolazione che prelevano l'acqua surriscaldata dai collettori ritorno utenze e attraverso gli scambiatori e i collettori mandata distribuiscono l'acqua surriscaldata alle utenze. L'acqua surriscaldata alimenta due circuiti distinti: tecnologico e riscaldamento. Data la notevole lunghezza delle reti di distribuzione, al fine di effettuare un risparmio di energia, viene adottato il sistema ad isole termiche che consiste in un circuito ad anello con pompa di circolazione localizzata nell'area e regolazione della temperatura con iniezione e restituzione di acqua surriscaldata proveniente dal circuito principale.

Tutti gli spurghi del ciclo termico e delle caldaie sono convogliati in serbatoi atmosferici per il loro raffreddamento e successivo invio attraverso pompe e/o tubazioni dedicate alla vasca tecnologica e in seguito rilanciata all'Impianto di Trattamento di acque Reflue.

3.2 Impianti di produzione e distribuzione di aria compressa

Gli impianti di produzione di aria compressa si trovano in due sale compressori: sala Carrozzeria e sala Presse, indicate nella figura sottostante.



Figura 7 Impianti di produzione di aria compressa

I compressori aspirano aria ambiente, elevandone la pressione a 6,2 bar(g) (con una pressione minima garantita di 5,9 bar(g) al collettore). Il parco macchine è costituito da:

- Otto compressori aria con portate da 7.000 a 20.000 Nmc/h, di cui sei centrifughi e due a vite;
- Sette essiccatori aria con portate da 15.000 a 25.000 Nmc/h a ciclo frigorifero a compressione;
- Cinque surpressori aria con portate da 1.000 Nmc/h alternativi a doppio effetto.

I compressori centrifughi consistono essenzialmente di un corpo contenente una girante, che imprime un'alta velocità all'aria, ed un diffusore, costituito da un certo numero di canali divergenti nei quali l'aria è rallentata, con conseguente aumento di pressione statica. Nelle figure seguenti, una rappresentazione schematica dei compressori centrifughi:

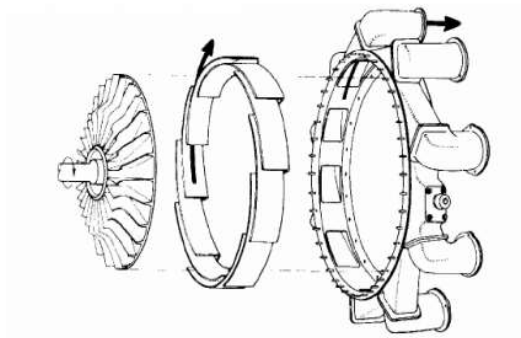


Figura 8 Schema di un compressore centrifugo

L'aria viene aspirata assialmente dalla parte centrale della girante e fatta ruotare velocemente dalla palettatura. In ogni punto del flusso attraverso la girante, la pressione statica aumenta dal centro all'estremità della pala per equilibrare la forza centrifuga. L'aria viene poi convogliata in un diffusore costituito da canali divergenti (parte statorica), che converte l'energia cinetica in energia di pressione: in particolare, i compressori centrifughi hanno un grado di reazione pari a $\frac{1}{2}$, cioè l'aumento di pressione avviene per metà nella girante e per metà nel diffusore. È necessario considerare che, in questa tipologia di compressori, l'aria raggiunge velocità molto alte all'estremità delle pale e ciò comporta sforzi elevati; inoltre maggiore è la velocità di rotazione della girante e maggiore sarà la portata e l'aumento di pressione.

Per quanto riguarda i compressori a vite, il gruppo pompante è composto da due alberi rotanti che, sfruttando il principio della compressione interna, ruotano con senso di rotazione tra loro opposto. La rotazione delle viti provoca la chiusura dell'aspirazione e la riduzione progressiva dello spazio tra rotori e statore; cioè le due viti accoppiate incamerano l'aria tra i loro profili e lo statore determinando una spinta longitudinale e un relativo aumento di pressione. [14]

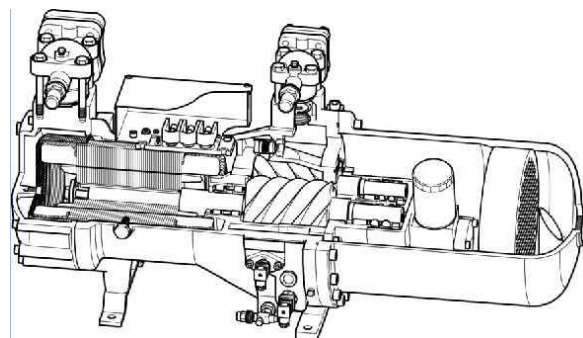


Figura 9 Schema di un compressore a vite

Altri componenti fondamentali dell'impianto di produzione di aria compressa sono gli essiccatori. L'aria in uscita dai compressori presenta un alto grado di umidità che viene eliminata tramite essiccatori fino al raggiungimento di un'umidità relativa che non sia in grado di influenzare le attività lavorative (verniciatura, regolazioni pneumatiche, ecc.), il cui valore, fissato contrattualmente, è circa del 10%.

Per l'officina di Verniciatura, dove le esigenze di processo esigono un controllo dell'umidità particolare, sono previsti filtri ceramici per un'ulteriore filtrazione.

Inoltre, a seconda delle esigenze del Cliente, una parte dell'aria compressa essiccata può essere portata ad una pressione ancora maggiore (dai 10 ai 12 bar) tramite surpressori, e distribuita tramite la rete aria surpressa alle condizioni stabilite contrattualmente. La rete aria surpressa è una rete distinta da quella dell'aria compressa ed è anch'essa provvista di misuratori della portata di aria ceduta. I surpressori sono ubicati nella sala compressori di Presse e di Carrozzeria.

Ai fini del loro funzionamento, le macchine necessitano di acqua di raffreddamento, che proviene dal circuito torri evaporative, che scaricano l'acqua raffreddata in una vasca, dalla quale un sistema di pompe provvede all'invio alle macchine. In alternativa all'utilizzo delle torri può essere utilizzata direttamente l'acqua industriale. Nelle vasche viene controllato il valore di conducibilità dell'acqua tramite conducimetro e, se questo risulta essere maggiore di 800-900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, viene eseguito lo spurgo di parte dell'acqua contenuta ed immessa nuova acqua industriale nella vasca. In quest'ultima sono additivate sostanze chimiche antincrostanti e antialghe per mantenere gli impianti in buono stato di funzionamento.

Le acque di spurgo delle vasche delle torri evaporative e le condense dell'aria compressa e surpressa sono convogliate e trattate all'Impianto di Trattamento delle Acqua Reflue dello stabilimento.

In relazione alla minimizzazione dell'energia elettrica consumata, gli operatori mettono in servizio le macchine di taglia idonea con riferimento al consumo istantaneo di aria compressa dello Stabilimento, compatibilmente con la disponibilità delle macchine. L'assetto di marcia viene impostato sulla stagionalità nel rispetto dei parametri contrattuali definiti con il Cliente per ogni vettore e nell'ottica di ottimizzazione dei consumi specifici di produzione e distribuzione.

3.3 Impianti di produzione e distribuzione delle acque primarie

Il servizio di trattamento delle acque primarie fornisce e distribuisce acqua demineralizzata alle utenze, nella quantità e qualità richieste in funzione dei fabbisogni degli utilizzatori.

L'acqua demineralizzata è prodotta per mezzo di impianti appositi a partire da acqua industriale in ingresso, prevalentemente acquistata da ente esterno, SAP.

La demineralizzazione è un processo chimico-fisico di trattamento destinato all'eliminazione, totale o parziale, dei sali disciolti. La produzione di acqua demineralizzata avviene in un impianto con resine a scambio ionico: le resine sono contenute in una colonna dove avvengono le operazioni di scambio, sopra la quale viene installata una valvola per il controllo automatico delle fasi di lavaggio e rigenerazione. Quest'ultima è un'operazione periodica necessaria al mantenimento delle capacità di scambio della resina, che tende ad esaurirsi in seguito al passaggio di un determinato volume d'acqua; prima che avvenga l'esaurimento è necessario che essa venga trattata con una soluzione rigenerante ricca dello stesso tipo di ioni che perso durante lo scambio. Durante la rigenerazione, l'apparecchio non può erogare acqua trattata: per garantire la continuità del servizio, sono previste due colonne di scambio in parallelo e con generazioni alternate. La demineralizzazione avviene attraverso un doppio passaggio; l'acqua viene prima trattata con resine cationiche per la rimozione degli ioni positivi, poi con resine anioniche per la rimozione di quelli negativi. Queste resine sono contenute in bombole separate e per ognuna di esse è prevista una rigenerazione differente: acido cloridrico per le resine cationiche e soda caustica per quelle anioniche. [15]



Figura 10 Schema di processo per la produzione di acqua demineralizzata

3.4 Impianto di trattamento delle acque reflue

L'impianto di trattamento delle acque reflue scarica in acque superficiali, torrente Sangone, rispettando i parametri del Decreto Legislativo 152/06.

È costituito da sei vasche di sedimentazione gravimetrica, da due vasche di additivazione veloce, da due chiaroflocculatori e da quattro filtri finali a carbone attivo.

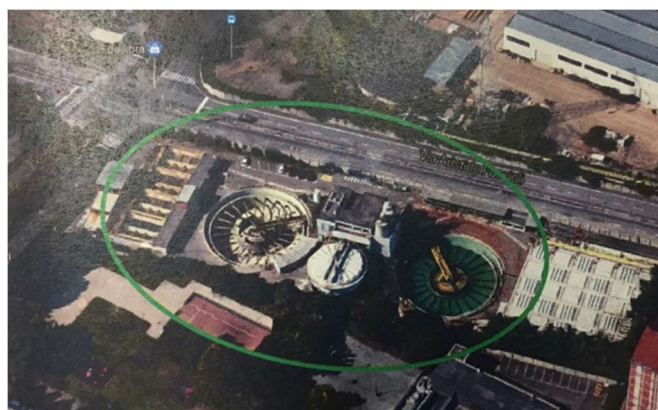


Figura 11 Impianto di trattamento delle acque reflue

La quantità di reflui in ingresso all'impianto è monitorata in continuo tramite due misuratori di portata, uno per ogni canale, sia con il fine di un dosaggio opportuno dei reagenti chimici per la depurazione sia per il controllo della portata in ingresso: essa ha infatti un limite autorizzativo pari a 600 mc/h medio annuo. In caso di rilevamento di un valore di portata elevato, non in presenza di precipitazione meteoriche, si valuta l'entità dell'incremento orario e si predispone l'impianto per attivare, eventualmente, anche la seconda linea di trattamento. Se l'incremento è di breve durata l'impianto è in grado di ammortizzare la variazione senza problemi.

Nell'impianto si distinguono due linee specifiche: la linea acque e la linea fanghi.

3.4.1 Linea acque

La linea acque comprende tre stadi:

1. il pretrattamento: processo di tipo fisico utilizzato per la rimozione di parte delle sostanze organiche sedimentabili contenute nel liquame. Comprende la grigliatura, la sabbiatura, la sgrassatura, la sedimentazione primaria: il refluo in ingresso attraversando le vasche di sedimentazione a bassa velocità, si libera dalle particelle solide, ad esempio sabbia, che cadono verso il basso a causa della forza di gravità; la velocità del liquame è abbastanza bassa (20-30 cm/s), per consentire la sedimentazione in tempi accettabili. Poiché il materiale da separare è di tipo granuloso, cioè sedimenta senza interferire con le altre particelle e il moto del fluido è laminare, la velocità di sedimentazione delle particelle è regolata in prima approssimazione dalla legge di Stokes. Per quanto riguarda la sgrassatura e la disoleazione, queste comportano la separazione dell'olio che, avendo una densità inferiore a quella dell'acqua, si deposita verso l'alto.

Successivamente, un raschiatore e un annesso schiumatore hanno lo scopo di raccogliere ciò che si deposita sul fondo e sul pelo libero dell'acqua: la parte solida viene inviata tramite la linea fanghi all'ispessitore e poi alla filtropressa (trattamenti approfonditi nel paragrafo 3.4.2), mentre la parte surnatante viene raccolta in un'apposita vasca per poi essere smaltita.



Figura 12 Vasca di sedimentazione con raschiatore

2. il trattamento ossidativo biologico: processo di tipo biologico utilizzato per la rimozione delle sostanze organiche sedimentabili e non sedimentabili contenute nel liquame; l'impianto effettua un'azione depurativa e di stabilizzazione dei reflui attraverso il processo di flocculazione, sfruttato per eliminare particelle colloidali difficilmente sedimentabili o filtrabili: in particolare COD e tensioattivi. Tale processo consiste nello sciogliere nell'acqua da trattare sali di ferro o di alluminio, i quali idrolizzandosi danno luogo ad idrati fioccosi insolubili ed attenuano le forze elettrostatiche repulsive. Tali idrati sedimentano facilmente, trascinando le particelle in sospensione. Alla flocculazione (detta anche coagulazione) segue una decantazione per la separazione del precipitato fioccoso.

Il refluo così chiarificato, attraverso una stazione di sollevamento dotata di viti di Archimede, viene inviato al trattamento finale su filtri a carbone attivo.

3. trattamenti ulteriori realizzati a monte o a valle dell'ossidazione biologica, che permettono di ottenere un ulteriore affinamento del grado di depurazione e che comprendono trattamenti speciali per abbattere il contenuto di quelle sostanze che non vengono eliminate durante i primi due trattamenti.

3.4.2 Linea fanghi

Nella linea fanghi vengono trattati i fanghi, separati dal refluo chiarificato durante le fasi di sedimentazione previste nella linea acque, con lo scopo di eliminare l'elevata quantità di acqua che contengono e di ridurne il volume; in aggiunta, il materiale organico viene stabilizzato e gli organismi patogeni presenti distrutti, in modo tale da rendere lo smaltimento finale meno costoso e meno dannoso per l'ambiente.

Un ispessitore ha l'obiettivo di riduzione dell'umidità dei fanghi: questa diminuzione, ancorché lieve, comporta una sensibile riduzione del volume da trattare e, dunque, un consistente risparmio nel dimensionamento delle fasi successive. In seguito, la filtropressatura è un sistema di riduzione volumetrica di sostanze liquide che contengono solidi sospesi: il solido è pompato ad elevate pressioni dentro il filtro, la parte solida viene trattenuta nelle intercapedini tra piatti e telai, mentre dalla filtropressa esce la fase liquida. [16,17]

3.5 Impianto di depurazione delle acque di carrozzeria

L'impianto di trattamento acque reflue denominato I.D.A.C., Impianto Depurazione Acque Carrozzeria, è progettato e costruito per il trattamento di tutti gli scarichi inquinati derivanti dai processi di verniciatura e lavaggio delle scocche delle officine della Carrozzeria.

Gli inquinanti prevalenti da abbattere sono: i tensioattivi totali, soprattutto i non-ionici, i Fosfati e il COD solubile ed insolubile.

L'impianto è così costituito:

- Linea Fenton: pretrattamento della linea Vernice dei reflui provenienti dalle linee di verniciatura a base di resina e smalti d'acqua, e con altissima concentrazione di tensioattivi totali (in media 350 ppm). L'impianto Fenton è costituito da quattro reattori verticali dove vengono additivati in sequenza: acido solforico, per portare il pH a valori inferiori a 3, cloruro ferroso ed acqua ossigenata per attaccare radicalmente le lunghe catene dei tensioattivi e trasformarle in COD solubile, calce per portare il pH a valori intorno alla neutralità. L'uscita della sezione Fenton si unisce nella vasca di additivazione ai reflui linea Vernice.
- Linea Vernice: trattamento dei reflui provenienti dalla verniciatura e depurazione attraverso una flottazione, una sezione biologica e una chiarificazione. I reflui sono sottoposti a insufflaggio di gas in una vasca di flottazione, i componenti che hanno

maggiore affinità con il gas (aerofili) sono trascinati verso il pelo libero della vasca formando una schiuma caratterizzata da densità minore rispetto al liquido; i componenti maggiormente affini con il liquido (idrofilo) precipitano invece sul fondo, determinando la formazione di una miscela liquida ad alta densità.

- Linea Bonder: trattamento dedicato ai reflui provenienti dal processo di bonderizzazione, sgrassaggio della scocca con fosfato di zinco per favorire l'attaccamento del pigmento di vernice; i reflui vengono stoccati in una vasca e sottoposti a flocculazione, processo chimico in cui la fase solida tende a separarsi formando fiocchi in sospensione.

Ogni sezione d'impianto è fornita di pompe allontanamento fanghi che vengono inviati all'ispessitore e raccolti successivamente nella vasca fanghi.

Le acque chiarificate sono inviate alla fognatura pubblica secondo i parametri del Decreto legislativo 152/06.



Figura 13 Impianto di depurazione delle acque di carrozzeria

3.6 Impianto di rottura delle emulsioni oleose

L'impianto di rottura delle emulsioni oleose, denominato I.R.E.O., è costituito dalle seguenti sezioni:

- Stoccaggio reflui da trattare in appositi serbatoi;
- Due linee di rottura emulsioni oleose sotto vuoto (evaporatori multi-flash);
- Trattamento chimico-fisico di flocculazione;
- Trattamento biologico nitro-denitro.

Le due linee di rottura sotto vuoto lavorano in parallelo, il distillato in uscita da tali sezioni viene ulteriormente sottoposto ai restanti trattamenti di depurazione.



Figura 14 Impianto di rottura delle emulsioni oleose

3.6.1 Trattamento di rottura delle emulsioni

Tale sezione ha lo scopo di rompere il legame nelle emulsioni oleose tra l'acqua (95%) e l'olio (4%) dovuto agli emulganti, sostanze attive superficiali che causano la formazione di emulsioni. Ogni linea è costituita da:

- Un disoleatore a caldo;
- Un filtro carta;
- Un serbatoio di miscelazione;
- Un decantatore;
- Tre evaporatori sottovuoto;
- Due esauritori sotto vuoto.

L'emulsione oleosa in ingresso viene sgrassata attraverso il disoleatore a caldo primario che toglie l'olio libero e la filtrazione su carta che elimina le eventuali particelle solide, tracce di residui metallici. Nel serbatoio di miscelazione è addizionato acido acetico fino a portare il pH ad un valore di 5 - 6, allo scopo sia di allentare il legame tra olio ed acqua, sia per rendere il refluo non incrostante e ridurre in tal modo lo sporcamento delle superfici interne degli scambiatori di calore dove passa l'emulsione per scaldarsi. Il refluo chiarificato è alimentato agli evaporatori, il cui ambiente fisico determina un'immediata evaporazione flash dell'acqua costituente l'emulsione, mentre la miscela

ricca d'olio, rimasta liquida, è inviata agli esauritori dove si ottiene una miscela concentrata al 90%. L'olio esausto viene quindi stoccato e smaltito secondo la normativa vigente.

3.6.2 Trattamento fisico-chimico di flocculazione

Tale sezione ha lo scopo di ridurre l'eventuale olio trascinato dal distillato proveniente dalle due linee sottovuoto ed abbattere i metalli pesanti, rimasti solubili a causa di un pH acido. Tale sezione è costituita da:

- Una vasca di accumulo;
- Due vasche di reazione veloce;
- Un sedimentatore lamellare.

Il distillato è raccolto in una vasca di accumulo e tramite pompaggio inviato nelle vasche di reazione dove si addiziona cloruro ferrico, acido cloridrico, bentonite, calce e polielettrolita anionico; successivamente è inviato al sedimentatore lamellare dove avviene, per gravità, la separazione del fango. Il fango viene allontanato dal sedimentatore lamellare tramite pompaggio dal fondo ed inviato alla sezione trattamento fanghi. Il refluo chiarificato è inviato al trattamento biologico.

3.6.3 Trattamento biologico nitro-denitro

In tale sezione grazie all'azione metabolica dei batteri aerobici ed anossici si ha la demolizione del carico organico (COD solubile) e dell'ammoniaca fino a trasformarla in azoto gassoso, sostanze essenziali per lo sviluppo vitale dei batteri. Tale sezione è costituita da:

- Quattro vasche aerobiche di nitrificazione;
- Una vasca anossica di denitrificazione;
- Un separatore a membrane: l'acqua separata da questo sistema è inviata all'impianto di trattamento delle acque reflue.

3.7 Impianti di produzione e distribuzione di energia

frigorifera

L'Unità Operativa produce, presso il Polo Freddo, acqua refrigerata per il Cliente, ad uso tecnologico e di raffrescamento.



Figura 15 Gruppi frigoriferi e torri evaporative del Polo Freddo

Per la produzione dell'acqua refrigerata vengono utilizzati gruppi frigoriferi a compressione con un circuito chiuso, tramite un sistema di raffreddamento che utilizza torri evaporative.

I costruttori forniscono in genere le prestazioni delle caratteristiche dei compressori (potenza frigorifera resa, potenza assorbita) in funzione della temperatura del fluido condensante e della temperatura di ingresso dell'acqua refrigerata all'evaporatore. Il funzionamento dei gruppi frigoriferi seguono il ciclo Kelvin a compressione, secondo cui si applica un lavoro di compressione per permettere il passaggio di un fluido dallo stato gassoso a quello liquido; la compressione ed il cambiamento di stato producono calore, che è estratto dal ciclo. Il liquido è poi fatto espandere ed evaporare, sottraendo calore e producendo dunque l'effetto frigorifero desiderato.

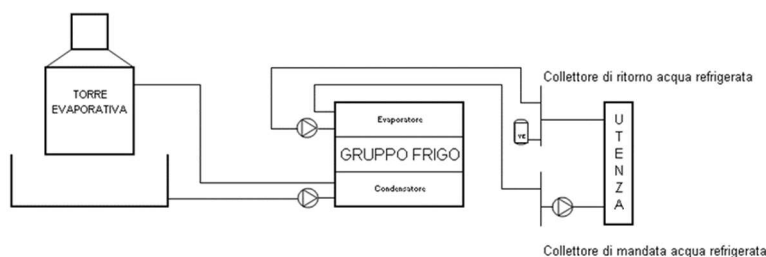


Figura 16 Schema di funzionamento del Polo Freddo

La torre evaporativa è essenzialmente uno scambiatore di calore in cui i fluidi, l'aria esterna e l'acqua calda proveniente dal condensatore dell'impianto frigorifero, vengono a contatto: il funzionamento delle torri evaporative è basato sull'utilizzazione del calore latente di evaporazione dell'acqua. La caratteristica peculiare delle torri evaporative è che il raffreddamento è ottenuto a spese di un modesto consumo d'acqua (qualche percentuale della portata in circolo), ma con un consumo di energia ridotto rispetto ad un equivalente raffreddamento ad aria.

Inoltre ogni gruppo frigo è dotato di:

- Una pompa per l'acqua refrigerata che garantisce la circolazione sull'evaporatore, aspirando l'acqua dal collettore dei ritorni dalle utenze e restituendola sul collettore di aspirazione delle pompe di circolazione verso le utenze;
- Una pompa per l'acqua di torre (acqua di condensazione) che aspira dalla vasca della torre evaporativa e invia l'acqua ai condensatori e da questi ai pacchi di raffreddamento della torre.

La circolazione dell'acqua refrigerata verso l'utenza è assicurata da un gruppo di pompaggio. Sul collettore di aspirazione delle pompe di circolazione è collegato un vaso di espansione, pressurizzato ad aria compressa.

3.8 Impianti di produzione e distribuzione dell'energia elettrica

Il Compensorio viene alimentato da una linea TERNI a 220 kV – 50 Hz da 120 MVA e da due linee 130 kV in entra-esce da 80MVA. La linea 220 kV costituisce la normale alimentazione mentre le due linee a 130 kV hanno funzione di riserva. La tensione in AT è trasformata, attraverso i trasformatori primari, alla tensione in MT 22 kV di distribuzione in stabilimento. In particolare, tramite i trasformatori TR1, TR2, TR3 si effettua la trasformazione 220 kV / 22 kV, con il TR4 si effettua la trasformazione 220 kV / 130-22 kV e con il TR6 la trasformazione 130 kV / 22 kV.



Figura 17 Impianti di trasformazione dell'energia elettrica

La trasformazione MT/BT e la distribuzione di energia elettrica in bassa tensione avviene tramite 99 cabine elettriche, distribuite nei vari fabbricati costituenti le officine di produzione e/o utilizzazione site nel Compensorio. La stazione e le cabine elettriche 1 e 2 (C.E.1 e C.E.2)

costituiscono i nodi principali del sistema elettrico in questione: esse sono annesse rispettivamente alle centrali termiche di alta e media pressione. I trasformatori di CE1 e CE2 alimentano il quadro blindato MT 3kV che fornisce energia a pompe di alimento e ventilatori delle caldaie e alla maggior parte dei trasformatori MT/BT.



Figura 18 Cabine elettriche

3.9 Schematizzazione dello stabilimento

Lo stabilimento dettagliatamente descritto è stato schematizzato in figura 19 al fine di ottenerne una visione di insieme: si ricorda infatti che l'obiettivo principale del modello che sarà applicato è quello di definire il sistema complessivo per facilitarne il controllo e la gestione energetica. Si riporta, dunque, una schematizzazione riassuntiva dei componenti principali e dei relativi flussi energetici, mettendone in evidenza i vettori primari e finali, rispettivamente entranti ed uscenti dal sistema stesso.

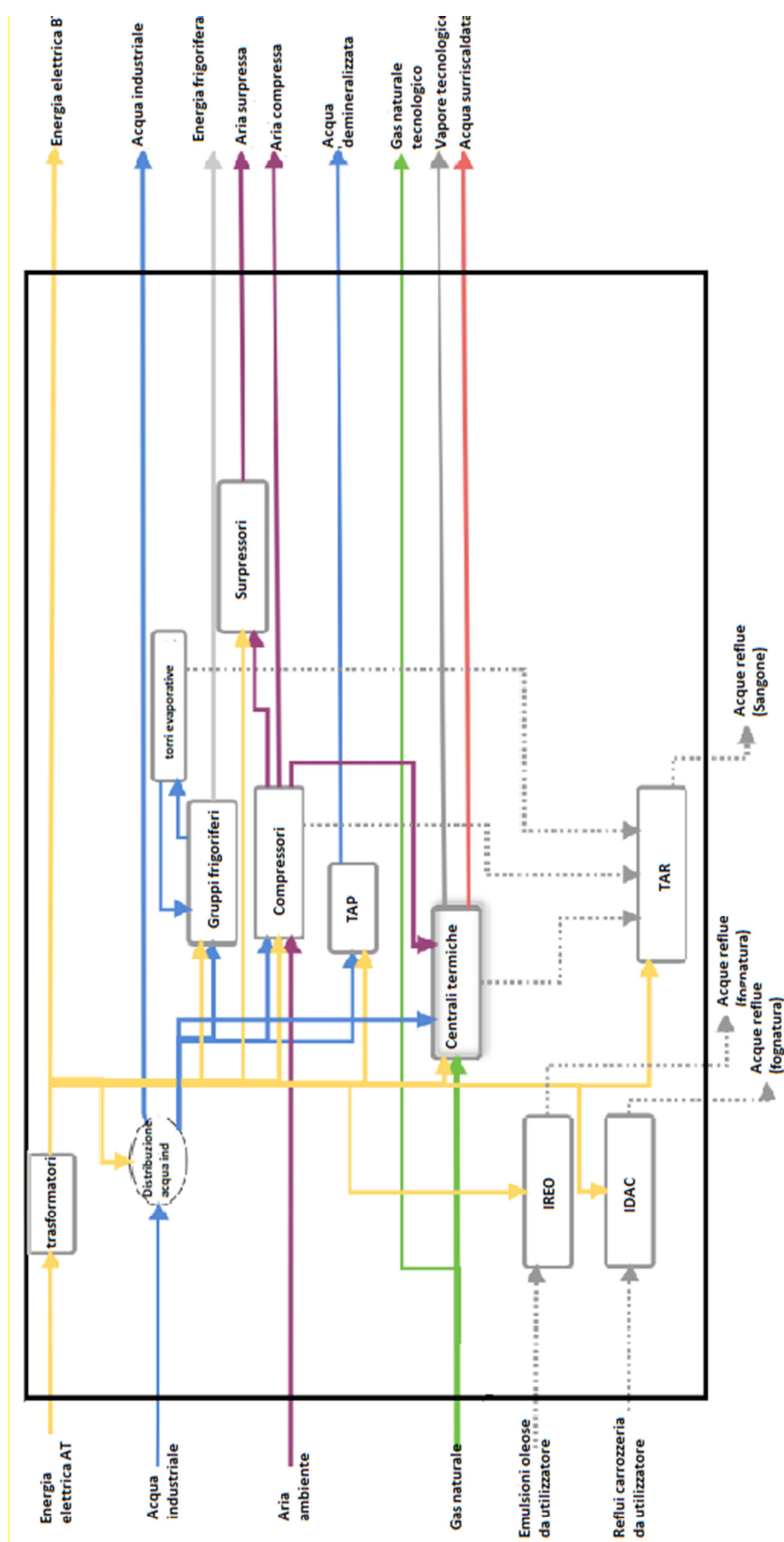


Figura 19 Schema a blocchi dello stabilimento

4 Caratterizzazione energetica

L'uso efficiente dell'energia si basa su uno studio dettagliato dei consumi energetici. Dunque, è fondamentale predisporre un sistema di monitoraggio energetico che costantemente controlli, verifichi e comunichi i consumi energetici. È il principio su cui si basano le tecniche dell'*Energy Monitoring and Targeting* dell'energia, metodologia improntata all'eliminazione degli sprechi, alla riduzione e controllo del livello di energia utilizzato e al miglioramento delle procedure. In particolare, tale metodo permette di constatare la presenza di eventuali sprechi evitabili o altre opportunità di riduzione dei consumi; è inoltre possibile la quantificazione della spesa energetica sui diversi centri di costo, potendo definire per ognuno di questi obiettivi di rendimento energetico e programmi di gestione.

Il punto di partenza per l'implementazione di un sistema di gestione dell'energia è l'individuazione del sistema da monitorare: nel capitolo precedente sono stati descritti in modo dettagliato tutti gli impianti che facenti parte della trattazione. È quindi necessaria l'identificazione di elementi chiave, come i parametri fisici e produttivi, gli impianti di lavorazione ed i vettori energetici utilizzati. Determinati gli energy drivers responsabili dei consumi, è possibile la formulazione del modello matematico in grado di caratterizzare il sistema.

Come in ogni altro campo di applicazione, anche in quello energetico, l'analisi Input-Output poggia sull'ipotesi di costanza dei coefficienti tecnici nel breve periodo. Questa ipotesi semplificativa rischia di penalizzare la validità dell'analisi Input-Output davanti ad uno scenario di forti cambiamenti delle variabili in gioco: in questo elaborato, uno dei passaggi fondamentali consta nella ricerca dei coefficienti tecnici che meglio descrivono lo stabilimento in analisi, sulla base di dati storici che, auspicabilmente, permettano di considerare la variabilità e la mutevolezza dei fattori produttivi. La relazione che intercorre tra i fattori produttivi e il prodotto si chiama *funzione di produzione*: questa dipende dallo stato della tecnologia, indagabile attraverso l'insieme delle conoscenze a disposizione e dei dati storici che consentono di combinare tra loro i fattori produttivi necessari per l'ottenimento dei prodotti finali desiderati. La combinazione fra i dati storici reperibili è permessa dall'utilizzo di metodi statistici con l'obiettivo di raggiungere funzioni di produzione lineari e significative.

I dati raccolti possono essere tracciati su un grafico per definire la linea di base del consumo generale. I tassi di consumo vengono rappresentati in un diagramma di dispersione in funzione della produzione, individuando l'approssimazione migliore attraverso l'interpolazione e la regressione. Il passo successivo consiste nel monitorare la differenza tra il consumo previsto e il consumo effettivo misurato attraverso i valori residui: diagrammando i residui in funzione dell'unità temporale è

possibile individuare il periodo di setup, cioè il periodo più recente e stabile di produzione, rispetto al quale viene determinata una baseline dei consumi caratteristica dell'impianto in analisi. Uno degli strumenti più comunemente utilizzati per questo è il CuSum. Il controllo e l'accertamento della significatività e dell'esattezza della baseline selezionata avviene tramite l'applicazione della stessa al periodo di monitoraggio. [11]

4.1 Consumi energetici

Per un monitoraggio efficace è necessaria la distribuzione di contatori in diversi punti dello stabilimento studiato, riassunti attraverso lo schema a blocchi riportato di seguito.

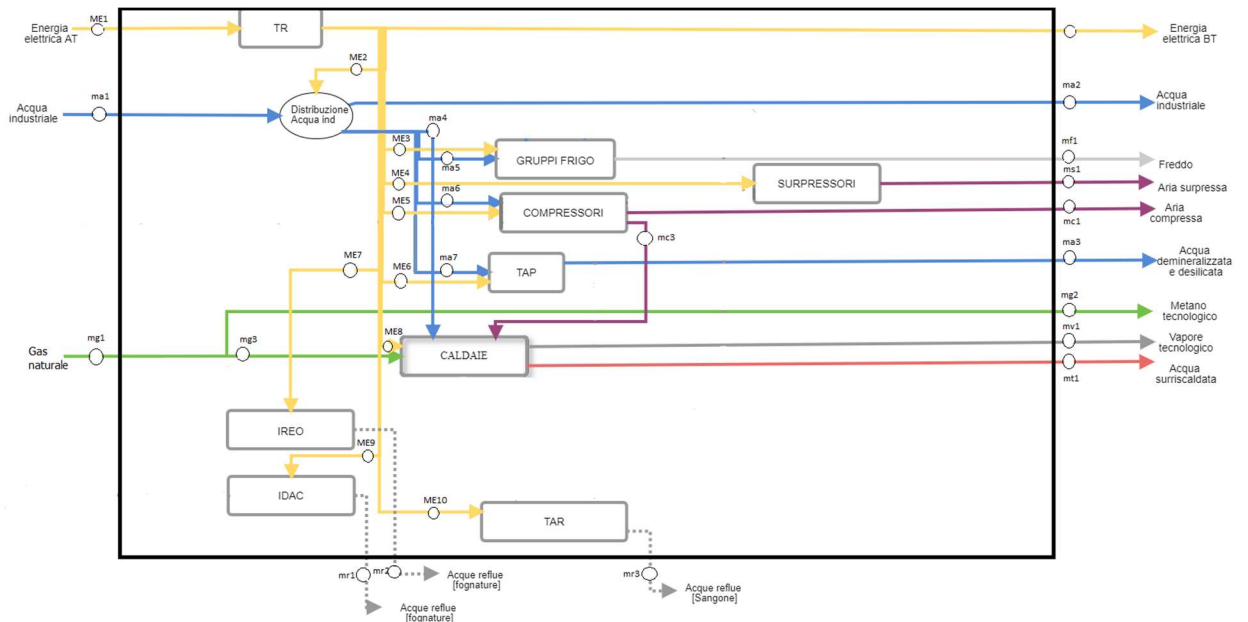


Figura 20 Schema a blocchi dello stabilimento con misuratori

simbolo	tipo	misura	simbolo	tipo	misura
ME1	contatore elettrico	energia elettrica AT	ma5	misuratore di portata	acqua industriale
ME2	contatore elettrico	energia elettrica BT	ma6	misuratore di portata	acqua industriale
ME3	contatore elettrico	energia elettrica BT	mg1	misuratore di portata	gas naturale
ME4	contatore elettrico	energia elettrica BT	mg2	misuratore di portata	gas tecnologico
ME5	contatore elettrico	energia elettrica BT	mg3	misuratore di portata	gas naturale
ME6	contatore elettrico	energia elettrica BT	mr1	misuratore di portata	reflui IDAC
ME7	contatore elettrico	energia elettrica BT	mr2	misuratore di portata	reflui IREO
ME8	contatore elettrico	energia elettrica BT	mr3	misuratore di portata	reflui TAR
ME9	contatore elettrico	energia elettrica BT	mf1	misuratore di portata	acqua refrigerata
ME10	contatore elettrico	energia elettrica BT	ms1	misuratore di portata	aria surpressa
ma1	misuratore di portata	acqua industriale	mc1	misuratore di portata	aria compressa
ma2	misuratore di portata	acqua industriale	mc2	misuratore di portata	aria compressa
ma3	misuratore di portata	acqua demi	mv1	misuratore di portata	vapore tecnologico
ma4	misuratore di portata	acqua industriale	mt1	misuratore di portata	acqua surriscaldata

Tabella 1 Elenco misuratori

In figura sono stati riportati solamente i vettori utilizzati ai fini della caratterizzazione energetica, la maggior parte dei quali fornita di misuratori: la seguente analisi è stata permessa, infatti, dalla presenza di misuratori di portata e contatori elettrici in ogni reparto considerato; si fa riferimento in particolare a:

- Impianti di produzione di aria compressa: 16 contatori elettrici, 30 misuratori di portata d'aria;
- Impianti di produzione di aria surpressa: 2 contatori elettrici, 1 misuratore di portata d'aria;
- Impianti di produzione di energia frigorifera: 3 contatori elettrici, 2 misuratori di acqua refrigerata;
- Impianti di trattamento di acque primarie: 5 contatori elettrici, 3 misuratori di acqua in uscita;
- Impianti di trattamento di acque reflue: 8 contatori elettrici, 1 misuratore di portata in uscita;
- Impianti di trattamento delle acque di carrozzeria: 1 misuratore elettrico, 1 misuratore di portata in uscita;
- Impianti di rottura emulsioni oleose: 2 contatori elettrici, un misuratore di portata in uscita;
- Centrali termiche: 6 misuratori di portata di gas naturale, 20 misuratori di calore, 38 contatori elettrici.

È necessario segnalare che il vettore consumo di energia elettrica entrante nel sistema di distribuzione dell'acqua industriale, non è monitorato da misuratori in corrispondenza di tutti i componenti che ne fanno parte: per questo motivo, la quantità di energia elettrica utilizzata da tali impianti è stata calcolata dalla differenza tra l'energia elettrica totale in bassa tensione e quella assorbita dalle altre utenze e dal Cliente.

Da una prima analisi macroscopica, sono stati ottenuti i seguenti grafici in riferimento al consumo globale di energia elettrica e gas naturale dei trentasei mesi analizzati.

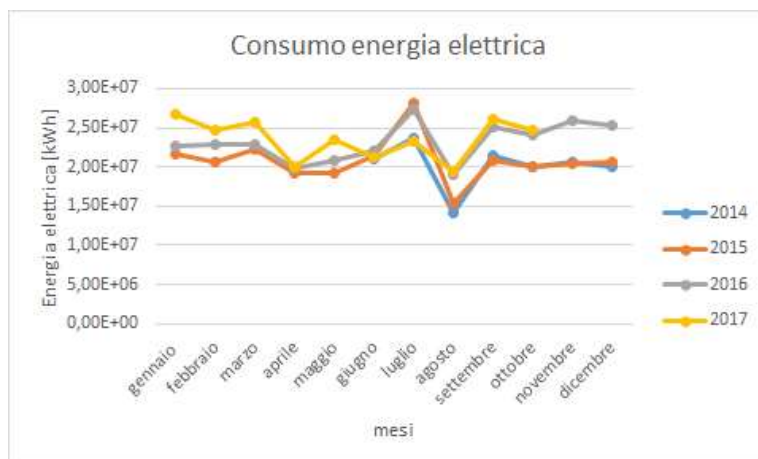


Figura 21 Consumo energia elettrica AT negli ultimi quattro anni

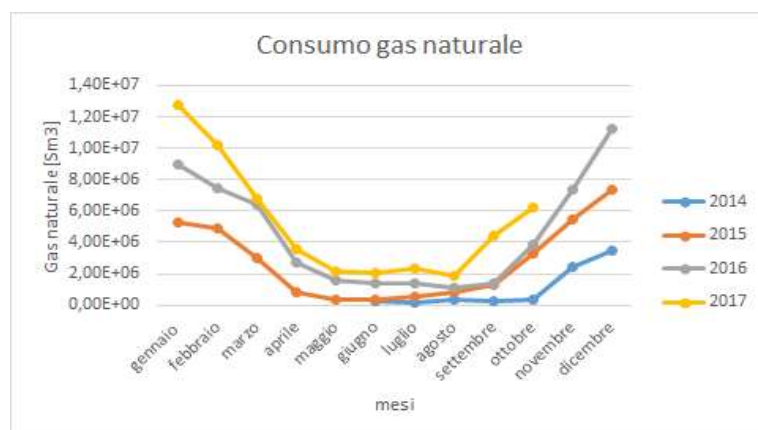


Figura 22 Consumo gas naturale negli ultimi quattro anni

Come rappresentato in figura 22, il gas naturale è utilizzato per il riscaldamento invernale e, in parte, per la produzione di vapore tecnologico. Le curve evidenziano un andamento parabolico, tipico del consumo di gas naturale ad uso riscaldamento, ma è altresì evidente l'utilizzo di una quota di combustibile anche durante i mesi estivi. I consumi energetici diagrammati, comunque, non forniscono indicazioni su come vengano utilizzate le risorse, né evidenziano un andamento lineare caratteristico.

È stato necessario indagare i consumi attraverso un modello energetico, implementato successivamente all'identificazione dei confini di tutte le attività energivore. Un modello energetico parte dalla raccolta organizzata dei dati di consumo relativi ad ogni utilizzatore energetico. Tutte le

utenze sono state classificate e ripartite in una tabella che raccoglie, per ciascuna, i dati di consumo dell'energia e gli energy drivers mediante gli strumenti disponibili in sito. Per lo studio della relazione che intercorre tra la variazione dei vettori impiegati e le quantità prodotte è necessario introdurre un'ulteriore valutazione: quella relativa all'orizzonte temporale entro il quale si sviluppa l'analisi. Questo passaggio è determinante, soprattutto nel caso di valutazioni di impianti industriali:

- la scelta di un periodo eccessivamente breve può non essere adatta alla segnalazione di cambiamenti nel sistema, come interventi di sostituzione di componenti impiantistici;
- la scelta di un periodo eccessivamente prolungato rischia di rendere il sistema insensibile alle variazioni repentine o riassorbite nel corso del funzionamento.

I dati, quindi, sono stati raccolti con periodicità mensile: l'idea iniziale si basava sull'utilizzo di un periodo più limitato, dati giornalieri, garantendo un numero più abbondante di osservazioni e quindi risultati più precisi; ma è apparso, durante l'analisi, che alcuni cambiamenti relativi al sistema non risultavano evidenti. Inoltre, il periodo temporale relativo alla raccolta dati è stato scelto coerentemente alla disponibilità di valori per tutti gli impianti considerati: in particolare, come approfondito in seguito, per la definizione del periodo di setup sono stati analizzati i dati del 2014, 2015 e 2016; per il monitoraggio e il controllo delle baseline trovate, sono stati scelti i primi quattro mesi del 2017.

I dati mensili di partenza per la definizione del periodo di setup, sono stati ordinati nelle tabelle dei paragrafi seguenti.

4.1.1 Consumi di energia elettrica

Nello stabilimento l'energia elettrica viene utilizzata per tutte le tipologie di processo studiate. L'energia elettrica in alta tensione è interamente acquistata da ENEL. Sia l'energia elettrica fornita al cliente, cioè la domanda finale, sia quella destinata all'autoconsumo, domanda intermedia, è utilizzata in bassa tensione. I consumi ordinati di seguito attraverso tabelle riassuntive si riferiscono a energia elettrica in bassa tensione.

	consumo EE[kWh]	Aria compressa [Nm3]
gen-15	1.811.128	14.379.483
feb-15	1.818.675	14.785.375
mar-15	1.993.397	16.469.728
apr-15	1.872.500	15.592.378
mag-15	1.840.928	15.025.458
giu-15	1.865.039	15.889.883
lug-15	2.186.092	18.811.592
ago-15	1.470.818	11.097.633
set-15	2.265.832	18.498.508
ott-15	2.110.001	18.043.778
nov-15	2.023.815	16.940.837
dic-15	2.136.099	15.489.163
gen-16	1.980.967	16.765.185
feb-16	2.051.749	18.037.159
mar-16	2.213.461	19.107.153
apr-16	2.166.363	18.646.447
mag-16	2.284.774	19.924.340
giu-16	2.163.723	18.907.829
lug-16	2.375.262	21.006.451
ago-16	1.768.025	14.488.567
set-16	2.431.324	21.828.312
ott-16	2.396.475	22.060.030
nov-16	2.388.242	21.681.074
dic-16	2.077.546	17.886.359

Tabella 2 Consumo di energia elettrica per la produzione di aria compressa

	consumo EE[kWh]	Aria surpressa [Nm3]
gen-15	9.451	358.641
feb-15	13.485	378.482
mar-15	12.387	433.902
apr-15	10.735	391.439
mag-15	11.376	393.874
giu-15	9.563	373.846
lug-15	14.536	503.212
ago-15	9.615	332.862
set-15	22.953	460.409
ott-15	14.851	569.704
nov-15	16.815	486.620
dic-15	11.300	388.137
gen-16	11.629	390.642
feb-16	15.121	468.955
mar-16	14.322	440.816
apr-16	15.256	532.219
mag-16	15.089	488.236
giu-16	11.850	544.089
lug-16	16.985	578.646
ago-16	10.570	444.190
set-16	15.885	626.677
ott-16	16.280	626.677
nov-16	10.353	431.847
dic-16	10.421	374.156

Tabella 3 Consumo di energia elettrica per la produzione di aria surpressa

	consumo EE[kWh]	Acqua trattata [m3]
gen-15	25.944	5.232
feb-15	23.540	7.295
mar-15	23.020	10.996
apr-15	19.280	11.114
mag-15	30.744	10.445
giu-15	33.860	14.526
lug-15	35.228	18.168
ago-15	30.004	6.634
set-15	30.816	9.450
ott-15	21.508	10.334
nov-15	22.220	12.296
dic-15	25.440	9.438
gen-16	26.920	6.387
feb-16	23.120	9.458
mar-16	21.700	10.595
apr-16	19.680	4.915
mag-16	23.132	10.099
giu-16	28.068	7.606
lug-16	31.568	8.136
ago-16	24.684	8.400
set-16	24.272	8.974
ott-16	25.002	8.125
nov-16	28.472	9.690
dic-16	22.604	6.383

Tabella 4 Consumo di energia elettrica per il trattamento delle acque primarie

	consumo EE[kWh]	Acqua in uscita [m3]
gen-15	58.782	110.370
feb-15	33.900	102.400
mar-15	39.728	138.490
apr-15	19.268	147.580
mag-15	10.616	141.060
giu-15	9.657	121.900
lug-15	9.998	103.300
ago-15	11.689	93.500
set-15	17.995	97.920
ott-15	23.046	107.440
nov-15	36.100	80.030
dic-15	30.264	91.680
gen-16	72.195	126.440
feb-16	50.104	106.140
mar-16	34.263	116.310
apr-16	26.919	105.030
mag-16	23.402	130.160
giu-16	25.360	125.210
lug-16	26.966	144.130
ago-16	36.214	139.680
set-16	27.850	114.540
ott-16	17.456	104.850
nov-16	21.449	113.470
dic-16	35.419	117.500

Tabella 5 Consumo di energia elettrica per il trattamento delle acque reflue

	consumo EE[kWh]	Freddo [MJ]
gen-15	132.999	184.469
feb-15	131.623	165.802
mar-15	156.907	221.368
apr-15	222.826	254.291
mag-15	203.261	95.511
giu-15	352.170	493.464
lug-15	622.812	1.194.484
ago-15	389.967	382.868
set-15	337.636	497.846
ott-15	249.271	233.449
nov-15	232.716	209.564
dic-15	368.553	157.072
gen-16	250.733	159.904
feb-16	252.281	189.116
mar-16	306.719	286.392
apr-16	306.633	273.724
mag-16	313.685	367.656
giu-16	522.493	951.596
lug-16	968.790	2.384.496
ago-16	745.276	1.514.292
set-16	689.634	1.583.932
ott-16	499.789	878.040
nov-16	498.069	685.932
dic-16	419.680	614.460

Tabella 6 Consumo di energia elettrica per la produzione di energia frigorifera

	consumo EE[kWh]	Vapore [MJ]	Gradi giorno
gen-15	940.548	46.803.658	481
feb-15	1.190.473	40.420.880	336
mar-15	1.036.470	34.433.454	239
apr-15	459.835	30.063.402	170
mag-15	311.747	28.177.209	0
giu-15	335.675	30.224.959	0
lug-15	406.312	32.078.345	0
ago-15	301.272	28.639.542	0
set-15	386.934	37.441.557	0
ott-15	603.421	31.626.024	152
nov-15	799.472	39.300.992	274
dic-15	1.210.452	52.134.742	411
gen-16	1.553.271	59.944.600	443
feb-16	1.714.594	46.280.722	340
mar-16	1.205.311	45.189.363	267
apr-16	596.960	37.440.951	102
mag-16	393.660	40.227.857	0
giu-16	384.130	35.584.080	0
lug-16	342.972	29.882.638	0
ago-16	314.324	20.866.310	0
set-16	317.332	28.789.660	0
ott-16	611.232	51.962.655	156
nov-16	1.133.478	79.659.246	291
dic-16	2.265.660	92.461.339	455

Tabella 7 Consumo di energia elettrica per la produzione di calore

	consumo EE[kWh]	Acqua in uscita [m3]
gen-15	91.760	4.010
feb-15	79.000	5.190
mar-15	126.900	13.240
apr-15	106.700	6.080
mag-15	102.880	4.350
giu-15	102.600	33.990
lug-15	113.120	31.400
ago-15	94.840	9.500
set-15	73.300	3.750
ott-15	60.520	3.560
nov-15	73.060	3.740
dic-15	89.540	4.770
gen-16	77.340	2.520
feb-16	76.320	4.290
mar-16	91.600	5.890
apr-16	88.100	5.330
mag-16	67.660	9.350
giu-16	60.180	18.450
lug-16	63.660	19.960
ago-16	58.200	7.050
set-16	64.840	10.570
ott-16	66.260	18.360
nov-16	71.780	24.410
dic-16	70.920	18.530

Tabella 8 Consumo di energia elettrica per la depurazione delle acque di carrozzeria

	consumo EE[kWh]	Acqua in uscita [m3]
gen-15	40.000	1.053
feb-15	40.406	1.150
mar-15	55.588	1.180
apr-15	54.758	1.456
mag-15	48.206	1.437
giu-15	41.253	1.306
lug-15	45.792	1.683
ago-15	56.070	1.457
set-15	59.549	1.957
ott-15	57.805	2.058
nov-15	49.363	1.748
dic-15	51.902	1.764
gen-16	40.527	1.698
feb-16	57.180	1.726
mar-16	51.654	1.602
apr-16	61.341	1.477
mag-16	58.964	1.555
giu-16	58.067	1.775
lug-16	54.718	1.412
ago-16	55.973	1.009
set-16	50.745	1.130
ott-16	48.030	1.371
nov-16	54.261	1.190
dic-16	49.767	1.347

Tabella 9 Consumo di energia elettrica per la rottura delle emulsioni oleose

Appare nella tabella 5, riferita al trattamento delle acque reflue, un consumo di energia elettrica molto basso nonostante le elevate portate trattate: questo è dovuto alla presenza di meccanismi che sfruttano la gravità.

	consumo EE[kWh]	Acqua distribuita [m3]
gen-15	112.162	252.061
feb-15	78.439	258.568
mar-15	117.406	333.330
apr-15	117.110	352.481
mag-15	101.238	322.951
giu-15	139.062	409.547
lug-15	147.134	625.437
ago-15	109.671	389.302
set-15	81.512	286.788
ott-15	76.161	263.532
nov-15	62.562	253.277
dic-15	69.280	258.388
gen-16	63.418	227.191
feb-16	58.558	253.444
mar-16	63.875	248.675
apr-16	69.992	265.703
mag-16	76.543	290.390
giu-16	81.168	290.409
lug-16	88.685	378.153
ago-16	69.073	333.323
set-16	72.791	279.741
ott-16	65.469	241.299
nov-16	71.658	257.226
dic-16	63.883	234.058

Tabella 10 Consumo di energia elettrica per la distribuzione di acqua industriale

4.1.2 Consumi di gas naturale

Il gas naturale è acquistato dalla rete SNAM e utilizzato per il funzionamento delle centrali termoelettriche o distribuito per uso tecnologico al Cliente.

In aggiunta, è necessario considerare che parte del vapore prodotto viene indirizzato e consumato dall'impianto di rottura delle emulsioni oleose, nelle quantità riportate in tabella 12.

	consumo GN [Sm3]	Vapore [MJ]	Gradi giorno
gen-15	5.286.648	46.803.658	481
feb-15	4.912.873	40.420.880	336
mar-15	3.010.534	34.433.454	239
apr-15	785.622	30.063.402	170
mag-15	375.273	28.177.209	0
giu-15	324.274	30.224.959	0
lug-15	507.431	32.078.345	0
ago-15	838.428	28.639.542	0
set-15	1.310.443	37.441.557	0
ott-15	3.271.512	31.626.024	152
nov-15	5.448.349	39.300.992	274
dic-15	7.382.423	52.134.742	411
gen-16	8.965.219	59.944.600	443
feb-16	7.481.241	46.280.722	340
mar-16	6.405.697	45.189.363	267
apr-16	2.727.380	37.440.951	102
mag-16	1.581.334	40.227.857	0
giu-16	1.355.554	35.584.080	0
lug-16	1.434.581	29.882.638	0
ago-16	1.129.929	20.866.310	0
set-16	1.389.979	28.789.660	0
ott-16	3.830.578	51.962.655	156
nov-16	7.406.889	79.659.246	291
dic-16	11.294.728	92.461.339	455

Tabella 11 Consumo di gas naturale per la produzione di calore

	consumo ET[MJ]	Acqua in uscita [m3]
gen-15	1.089.899	1.453
feb-15	1.197.982	1.150
mar-15	892.157	1.180
apr-15	1.148.740	1.456
mag-15	1.493.115	1.437
giu-15	1.372.452	1.306
lug-15	1.471.949	1.683
ago-15	1.424.551	1.457
set-15	1.378.912	1.957
ott-15	942.773	2.058
nov-15	1.236.144	1.748
dic-15	1.415.320	1.764
gen-16	1.509.272	1.698
feb-16	1.606.210	1.726
mar-16	1.223.360	1.602
apr-16	1.607.309	2.477
mag-16	1.110.058	1.555
giu-16	1.067.356	1.775
lug-16	958.596	1.412
ago-16	976.954	1.009
set-16	825.754	1.130
ott-16	957.635	1.371
nov-16	1.135.923	1.190
dic-16	1.438.399	1.347

Tabella 12 Consumo di calore per la rottura di emulsioni oleose

4.1.3 Consumi di acqua industriale

Nel caso dell'acqua industriale, sono segnalate diverse tipologie di consumi e utilizzi: dal consumo nelle centrali termiche per la produzione di vapore tecnologico e acqua surriscaldata per il

riscaldamento, all'uso adibito al raffreddamento degli impianti di produzione di aria compressa e di energia frigorifera. Parte dell'acqua industriale entrante nello stabilimento, invece, viene destinata direttamente al Cliente oppure prima demineralizzata e poi ceduta. L'acqua utilizzata è acquistata da SAP, Società Acqua Potabile, sulla base di un contratto a prezzo fisso a concorrenza di una quota massima prelevabile dalla rete: per questo motivo, dall'Unità Operativa, generalmente è preferita questa modalità di rifornimento rispetto all'utilizzo dei pozzi, che comportano un importante consumo elettrico durante il sollevamento.

	consumo AI [m3]	Vapore [MJ]	Gradi giorno
gen-15	21.714	46.803.658	481
feb-15	19.791	40.420.880	336
mar-15	21.268	34.433.454	239
apr-15	19.918	30.063.402	170
mag-15	12.385	28.177.209	0
giu-15	15.291	30.224.959	0
lug-15	16.424	32.078.345	0
ago-15	16.453	28.639.542	0
set-15	14.297	37.441.557	0
ott-15	16.611	31.626.024	152
nov-15	14.732	39.300.992	274
dic-15	19.580	52.134.742	411
gen-16	20.954	59.944.600	443
feb-16	18.193	46.280.722	340
mar-16	16.250	45.189.363	267
apr-16	14.732	37.440.951	102
mag-16	12.597	40.227.857	0
giu-16	12.940	35.584.080	0
lug-16	11.412	29.882.638	0
ago-16	9.560	20.866.310	0
set-16	8.153	28.789.660	0
ott-16	7.783	51.962.655	156
nov-16	21.957	79.659.246	291
dic-16	20.333	92.461.339	455

Tabella 13 Consumo di acqua industriale per la produzione di calore (sinistra)

	consumo AI [m3]	Aria compressa [Nm3]
gen-15	41.374	14.379.483
feb-15	48.916	14.785.375
mar-15	44.221	16.469.728
apr-15	57.792	15.592.378
mag-15	34.499	15.025.458
giu-15	31.597	15.889.883
lug-15	80.571	18.811.592
ago-15	37.291	11.097.633
set-15	67.556	18.498.508
ott-15	56.631	18.043.778
nov-15	56.484	16.940.837
dic-15	55.725	15.489.163
gen-16	44.671	16.765.185
feb-16	65.134	18.037.159
mar-16	48.819	19.107.153
apr-16	39.178	18.646.447
mag-16	49.856	19.924.340
giu-16	53.598	18.907.829
lug-16	52.895	21.006.451
ago-16	61.812	14.488.567
set-16	54.977	21.828.312
ott-16	60.397	22.060.030
nov-16	57.870	21.681.074
dic-16	51.513	17.886.359

Tabella 14 Consumo di acqua industriale per la produzione di aria compressa (destra)

	consumo AI [m3]	Freddo [MJ]
gen-15	1.204	184.469
feb-15	723	165.802
mar-15	865	221.368
apr-15	899	254.291
mag-15	1.153	95.511
giu-15	1.862	493.464
lug-15	7.712	1.194.484
ago-15	3.094	382.868
set-15	1.391	497.846
ott-15	1.633	233.449
nov-15	3.385	209.564
dic-15	1.460	157.072
gen-16	316	159.904
feb-16	1.268	189.116
mar-16	530	286.392
apr-16	684	273.724
mag-16	2.265	367.656
giu-16	2.938	951.596
lug-16	8.041	2.384.496
ago-16	3.758	1.514.292
set-16	2.425	1.583.932
ott-16	2.611	878.040
nov-16	3.308	685.932
dic-16	2.982	614.460

Tabella 15 Consumo di acqua industriale per la produzione di energia frigorifera

	consumo AI [m3]	Acqua in uscita [m3]
gen-15	612	1.053
feb-15	2.179	1.150
mar-15	1.274	1.180
apr-15	3.051	1.456
mag-15	3.828	1.437
giu-15	2.893	1.306
lug-15	2.736	1.683
ago-15	3.077	1.457
set-15	2.965	1.957
ott-15	2.028	2.058
nov-15	2.492	1.748
dic-15	5.708	1.764
gen-16	1.861	1.698
feb-16	2.307	1.726
mar-16	2.148	1.602
apr-16	1.801	1.477
mag-16	6.204	1.555
giu-16	4.576	1.775
lug-16	3.626	1.412
ago-16	4.854	1.009
set-16	4.002	1.130
ott-16	4.420	1.371
nov-16	2.268	1.190
dic-16	4.676	1.347

Tabella 16 Consumo di acqua industriale per la rottura delle emulsioni oleose

	consumo AI [m3]	Acqua in uscita [m3]
gen-15	5.285	5.232
feb-15	7.368	7.295
mar-15	11.106	10.996
apr-15	11.225	11.114
mag-15	10.549	10.445
giu-15	14.671	14.526
lug-15	18.350	18.168
ago-15	6.700	6.634
set-15	9.545	9.450
ott-15	10.438	10.334
nov-15	12.418	12.296
dic-15	9.533	9.438
gen-16	6.451	6.387
feb-16	9.553	9.458
mar-16	10.701	10.595
apr-16	4.964	4.915
mag-16	10.200	10.099
giu-16	7.682	7.606
lug-16	8.217	8.136
ago-16	8.484	8.400
set-16	9.063	8.974
ott-16	8.206	8.125
nov-16	9.787	9.690
dic-16	6.447	6.383

Tabella 17 Consumo di acqua industriale per la produzione di acqua demineralizzata

4.1.4 Consumi di aria compressa

In ultimo, la produzione di aria compressa non è solamente destinata al soddisfacimento della domanda finale ma, in parte, è utilizzata nelle centrali termiche per la produzione di calore.

In realtà l'aria compressa è sfruttata anche in altri impianti, per esempio per il trattamento delle acque reflue, ma il consumo attribuito a quei casi è trascurabile.

	consumo aria compressa [Nm3]	Vapore [MJ]	Gradi giorno
gen-15	1.702.877	46.803.658	481
feb-15	1.468.551	40.420.880	336
mar-15	1.256.944	34.433.454	239
apr-15	996.135	30.063.402	170
mag-15	1.107.782	28.177.209	0
giu-15	1.095.142	30.224.959	0
lug-15	963.782	32.078.345	0
ago-15	695.260	28.639.542	0
set-15	746.568	37.441.557	0
ott-15	775.152	31.626.024	152
nov-15	1.001.751	39.300.992	274
dic-15	1.590.149	52.134.742	411
gen-16	1.372.312	59.944.600	443
feb-16	1.263.537	46.280.722	340
mar-16	1.265.291	45.189.363	267
apr-16	1.091.221	37.440.951	102
mag-16	1.065.578	40.227.857	0
giu-16	1.014.620	35.584.080	0
lug-16	953.276	29.882.638	0
ago-16	955.518	20.866.310	0
set-16	548.721	28.789.660	0
ott-16	1.110.795	51.962.655	156
nov-16	1.263.580	79.659.246	291
dic-16	1.487.161	92.461.339	455

Tabella 18 Consumo di aria compressa per la produzione di calore

L'obiettivo del prossimo capitolo è la caratterizzazione energetica degli impianti, cioè la determinazione di una relazione lineare tra il consumo di ciascun vettore energetico primario e la produzione conseguibile. La relazione cercata è detta *funzione di produzione* ed è individuata sulla base dei dati storici elencati, per mezzo di metodi statistici.

4.2 Baseline dei consumi

4.2.1 Regressione lineare

Alcuni modelli statistici sono stati sfruttati con l'obiettivo di trarre conclusioni di carattere generale a partire da insiemi di dati limitati ai mesi studiati. Supponendo che Y rappresenti i consumi in

funzione di un determinato energy driver X e riportando su un piano cartesiano tali quantità, si ottiene, generalmente, un diagramma di dispersione. In particolare i valori X e Y sono raccolti rispettivamente sull'asse delle ascisse e su quello delle ordinate. Il grafico di dispersione è un primo strumento qualitativo per indagare graficamente se le coppie di punti presentino una relazione lineare. Una valutazione quantitativa di una presunta relazione lineare tra le variabili X e Y può essere perseguita per mezzo del coefficiente di correlazione di Pearson R:

$$R = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4.1)$$

Dove $cov(X,Y)$ è la covarianza di X e Y, mentre σ_X e σ_Y indicano la deviazione standard campionaria di X e Y. Tale coefficiente fornisce una misura di quanto i valori assunti dalla variabile dipendente Y dipendano in modo lineare da quelli assunti dalla variabile indipendente X. R è compreso nell'intervallo [-1;1], i cui estremi identificano la situazione di perfetta linearità nei casi di retta decrescente, -1, e crescente, 1.

La frequenza di campionamento è stata scelta in base mensile, al fine di riportare eventuali irregolarità del sistema: dati orari e giornalieri permetterebbero l'identificazione di un'equazione lineare più precisa ma, come anticipato in precedenza, non sono risultati adatti alla segnalazione di cambiamenti impiantistici e di processo.

Dalle rappresentazioni dei processi, riportate in seguito, appare una buona linearità tra consumo e produzione. I processi produttivi in cui l'uso dell'energia dipende fortemente dalla fisica del processo stesso, per esempio riscaldamento, compressione, refrigerazione, sono caratterizzati da un comportamento energetico regolare e per questo sono facilmente caratterizzabili; questa caratteristica è generalmente meno scontata nel caso in cui il consumo energetico sia indipendente dalla fisica.

Dopo aver apprezzato l'esistenza di una relazione sperimentale tra due variabili, si cerca l'espressione analitica di tale relazione, cioè un'equazione che legghi tra loro le variabili. Dall'analisi del diagramma a dispersione è generalmente possibile avere una rappresentazione intuitiva dell'andamento di una curva interpolante. Se i dati sono ben interpolati da una retta, è possibile definire la relazione che lega le variabili *lineare*. Lo scopo principale dell'interpolazione è la stima della variabile dipendente in funzione di quella indipendente: tale procedimento prende il nome di *regressione*. La funzione di regressione può essere rappresentata da una retta dei minimi quadrati interpolante i punti del diagramma a dispersione, detta *retta di regressione dei minimi quadrati*. Le funzioni di regressione forniscono quindi informazioni sul comportamento in media di una variabile al variare dell'altra, e consentono perciò di fare previsioni sulle manifestazioni future dei fenomeni congiunti sulla base del loro comportamento passato.

Tipicamente, nel caso di rappresentazione di processi produttivi, i diagrammi di dispersione possono assumere le seguenti configurazioni:

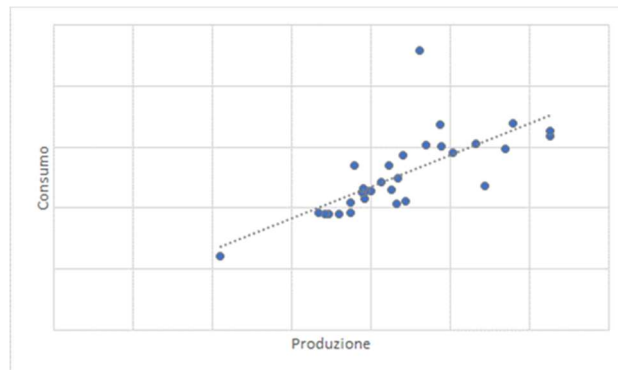


Figura 23 Esempio di diagramma di dispersione con intercetta nulla

In questo caso l'intercetta, cioè il punto in cui la produzione è nulla, è pari a 0: questo identifica un processo produttivo in cui i consumi sono solamente variabili e quindi dipendenti dal volume produttivo. La pendenza, invece, rappresenta il consumo specifico variabile: maggiore è la ripidità della curva di regressione, maggiore è il consumo specifico relativo. Generalmente, sono pochi i casi in cui il consumo fisso è nullo. L'andamento tipico dei consumi in funzione della produzione è il seguente:

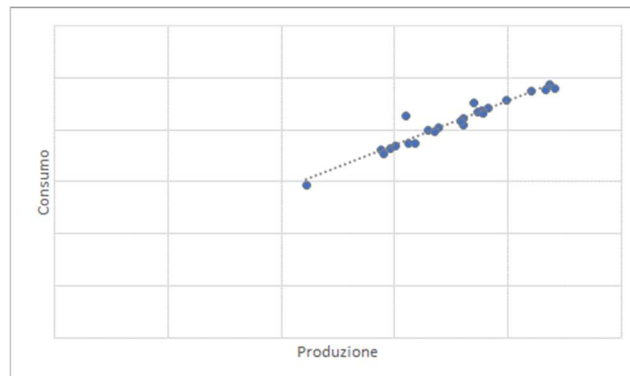


Figura 24 Esempio di diagramma di dispersione con intercetta non nulla

Casi più critici ai fini della caratterizzazione sono quelli con consumi fissi molto elevati, descritti, per esempio, in figura 25:

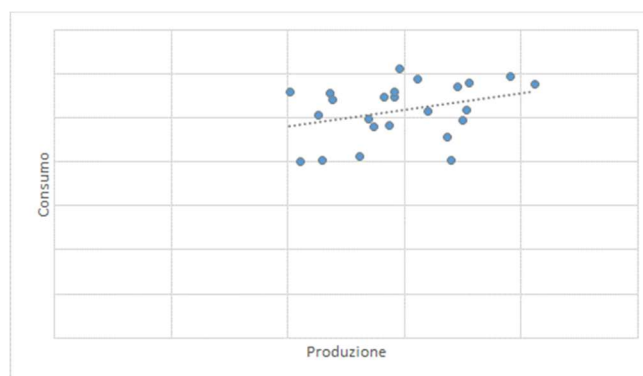


Figura 25 Esempio di diagramma a dispersione con intercetta elevata

Tale comportamento è risultato essere tipico degli impianti di trattamento delle acque e dovuto a caratteristiche intrinseche dei processi.

L'equazione canonica della retta di interpolazione dei punti rappresentati nel grafico di dispersione è:

$$Y = C0 + kX \quad (4.2)$$

dove X e Y sono le variabili indipendente e dipendente. Tale equazione può essere stimata applicando il metodo dei minimi quadrati.

$$C0 = \bar{Y} - K\bar{X} \quad (4.3)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2} \quad (4.4)$$

dove

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.5)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (4.6)$$

Nel caso in cui più variabili indipendenti influiscano sul valore di consumo, è necessario l'utilizzo di una relazione matematica multi variabile. Questo è il caso delle centrali termoelettriche: il consumo di gas naturale dipende sia dalla quantità di vapore tecnologico prodotto, sia dall'acqua surriscaldata ad uso riscaldamento.

Nel caso multi variabile, il legame fra consumo e energy driver è descritto dalla seguente equazione:

$$Y = C0 + k1 * X1 + k2 * X2 \quad (4.7)$$

In un diagramma a dispersione a due dimensioni, anziché rette di regressione, si definiscono piani di regressione dei minimi quadrati che interpolano un insieme di N punti dati (Y, X1, X2).

Analogamente alle rette, i piani di regressione rappresentano il legame tra le tre (o più) variabili considerate. [18]

4.2.2 Modello CuSum

Successivamente è stata sfruttata l'analisi statistica per confermare la veridicità dei risultati ottenuti dalla regressione tra consumi e energy drivers, permettendo dunque di utilizzare questi ultimi come modello di riferimento.

L'individuazione di eventuali scostamenti dei processi dalle caratteristiche di riferimento è stata permessa dall'utilizzo del modello CuSum (Cumulative Sum). Il CuSum è comunemente utilizzato per il monitoraggio di una caratteristica di qualità di diversi processi produttivi: in questo caso lo studio è riferito alla legge di previsione dei consumi energetici ottenuta precedentemente. Un diagramma CuSum è un grafico bidimensionale in cui viene riportato sull'asse delle ordinate l'andamento della somma cumulata della differenza tra ogni misura reale ed il valore misurato per mezzo dell'equazione di regressione del campione di controllo esaminato e sull'asse delle ascisse la variabile temporale. L'analisi di regressione permette di ottenere la stima dei consumi nella forma:

$$\hat{Y} = C0 + k1 * X1 + k2 * X2 \quad (4.8)$$

tale valore, confrontato con il consumo reale Y , è utilizzato per il calcolo della variabile di qualità, il *residuo*, cioè lo scarto tra i due valori studiati:

$$e = Y - \hat{Y} \quad (4.9)$$

I residui di un campione di dati sono caratterizzati da valor medio nullo e da una determinata varianza finché il sistema è stabile rispetto alla curva di regressione. Calcolati i residui, la variabile CUSUM è definita come:

$$CUSUM = \sum_i ei \quad (4.10)$$

Il vantaggio nell'uso del diagramma CuSum è quello di evidenziare velocemente uno scostamento del processo e di individuare eventuali anomalie: in particolare, finché le misurazioni non si discostano dal valore nominale, la curva del grafico rimane vicina allo zero. Un andamento positivo della curva indica che i risultati sono superiori al valore di riferimento mentre un andamento negativo indica l'opposto.

Il diagramma CuSum si è rivelato interessante per un'analisi iniziale dei campioni utilizzati: selezionando il tratto uniforme più recente è possibile avere una prima stima del periodo di setup: questo è il lasso temporale a cui appartengono i dati utilizzati per la determinazione dell'equazione caratteristica dei consumi.

Il raggiungimento di un modello energetico significativo è permesso dall'identificazione del periodo piu' attuale e stabile che rappresenti un riferimento valido per i consumi futuri: il periodo di setup. In particolare, una carta di controllo CuSum tabulare garantisce il monitoraggio di eventuali scostamenti del sistema dal normale comportamento e fornisce allo stesso tempo un limite con cui confrontare gli scostamenti stessi al fine di rilevare quando il processo sia fuori controllo. In altri termini, la carta di controllo permette un'individuazione piu' precisa del periodo di setup, rispetto al precedente diagramma.

La carta di controllo CuSum tabulare rappresenta le somme dei residui in due statistiche unilaterali, C^+ e C^- , confrontate con il limite H.

Inizialmente viene calcolata la media del valore assoluto delle differenze tra il residuo considerato e quello precedente:

$$MR_i = |e_i - e_{i-1}|, \forall i = 2, \dots, n \quad (4.11)$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_i MR_i}{n-1}. \quad (4.12)$$

Il valore ottenuto è utilizzato per il calcolo della deviazione standard del periodo di controllo:

$$sd = \frac{\overline{MR}}{1,128} \quad (4.13)$$

Successivamente sono stati calcolati:

- $K = 0,5 * sd$, valore di riferimento del CuSum a cui vengono confrontati i residui calcolati precedentemente;
- $H = h * sd$, dove h può assumere il valore di 4 o 5: nell'analisi seguente è stata posta uguale a 4 favorendo una maggiore velocità di segnalazione di eventuali scostamenti.

Infine,

$$C_i^+ = \max(0, e_i - (\bar{e} + K) + C_{i-1}^+) \quad (4.14)$$

$$C_i^- = \max(0, (\bar{e} - K) - e_i + C_{i-1}^-) \quad (4.15)$$

In seguito, sono riportate le considerazioni effettuate per ogni impianto, accompagnate dalle carte di controllo CuSum contenenti i valori delle statistiche unilaterali C_i^+ e C_i^- in funzione della variabile temporale mensile e confrontate al limite H. Per ognuno è presente il diagramma di dispersione che garantisce una prima indicazione sulla linearità della relazione che lega le variabili X e Y; successivamente, ipotizzando una prima equazione di regressione, sono stati costruiti i diagrammi CuSum per identificare il periodo stabile piu' recente, il periodo di setup. Per

l'accertamento della scelta del periodo di setup è stata utilizzata la carta CuSum tabulare, che segnala se i nodi del tratto considerato siano davvero relativi a cambiamenti significativi del sistema. La baseline dei consumi finale sarà relativa al periodo di setup scelto. [11,19]

L'obiettivo dei prossimi paragrafi è la caratterizzazione di tutti i consumi di vettori primari in funzione delle energy driver relativo ad ogni impianto, seguendo le basi teoriche spiegate.

4.2.3 Elaborazione dei dati relativi al consumo di energia elettrica

Il consumo di energia elettrica, come spiegato precedentemente, riguarda tutti gli impianti dello stabilimento. Attraverso i prossimi paragrafi sono raggiunte le equazioni caratteristiche dei consumi di energia elettrica in kWh, rappresentata dalla Y; le variabili indipendenti X identificano invece gli energy drivers specifici per ciascun impianto.

4.2.3.1 Impianti per la produzione di aria compressa

Inizialmente sono stati diagrammati i valori riferiti al consumo di energia elettrica in funzione dell'aria compressa prodotta. Attraverso la linea di interpolazione in figura e il coefficiente di correlazione lineare R, è possibile apprezzare la significativa linearità che lega le variabili.

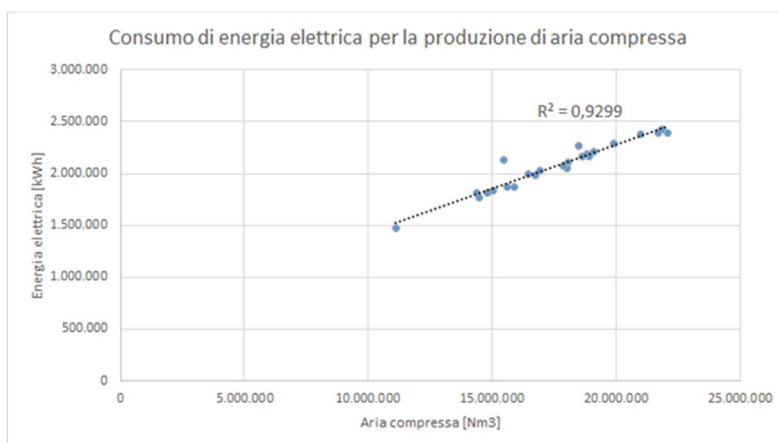


Figura 26 Diagramma di dispersione del consumo di EE per la produzione di aria compressa

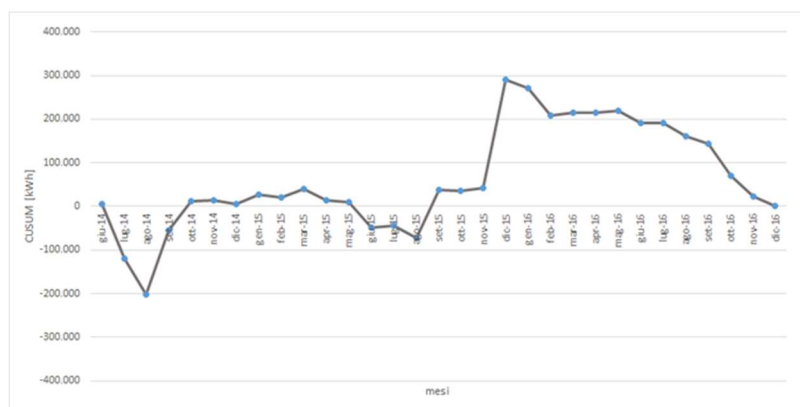


Figura 27 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la produzione di aria compressa

Come raffigurato nel grafico, il valore CUSUM, rappresentativo della variabile di consumo, è stato molto variabile nei trentasei mesi analizzati. In particolare, si segnala il picco in corrispondenza di dicembre 2015 causato dall'aumento del consumo specifico per carico di funzionamento ridotto dovuto alle festività del periodo. Dal grafico, quindi, è stato selezionato come periodo di riferimento gennaio 2016 e dicembre 2016. L'analisi del periodo selezionato e la relativa carta di controllo CuSum tabulare sono state ottenute cumulando i residui all'indietro.

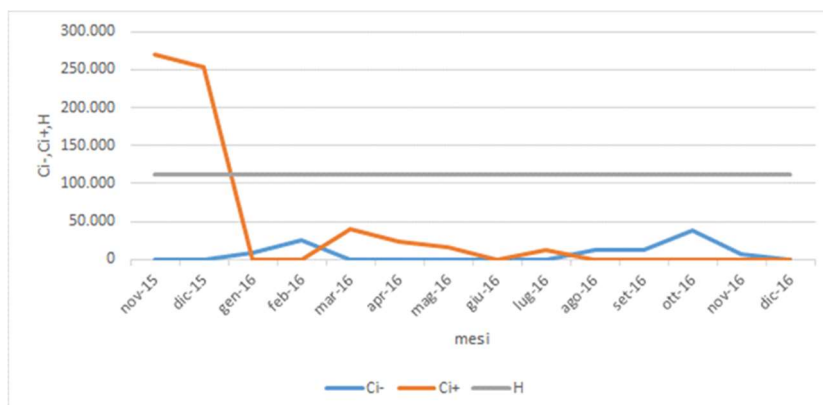


Figura 28 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per la produzione di aria compressa

In figura 28 è evidente il fuori controllo del sistema corrispondente a gennaio 2016, come da aspettative. Questo risultato conferma la correttezza del periodo di setup scelto. Sulla base di questo periodo, è stata trovata la seguente equazione caratteristica dei consumi:

$$Y = 515.801 + 0,087X[kWh], \quad (4.16)$$

dove X rappresenta il volume di aria compressa prodotta in Nm³.

4.2.3.2 Impianti per la produzione di aria surpressa

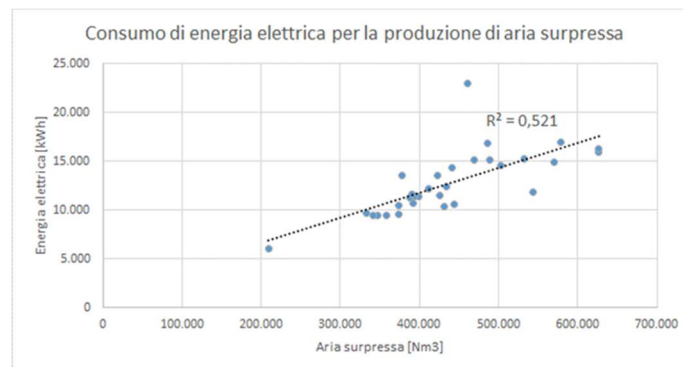


Figura 29 Diagramma di dispersione del consumo di EE per la produzione di aria surpressa

Anche nel caso dell'aria surpressa l'andamento dei dati storici è caratterizzato da linearità; inoltre, l'intercetta della retta di interpolazione è nulla: questo significa che i consumi fissi sono trascurabili rispetto al consumo variabile dipendente dal volume prodotto.

Il diagramma CuSum presenta significative variazioni, nonostante non siano stati effettuati interventi rilevanti sul sistema. Per l'individuazione del periodo di setup, si fa riferimento alla figura 30, ed è stato considerato il periodo giugno 2016-dicembre 2016: questa scelta è stata confermata dalla carta di controllo CuSum tabulare (figura 31) che evidenzia come il sistema vada fuori controllo proprio a giugno 2016.

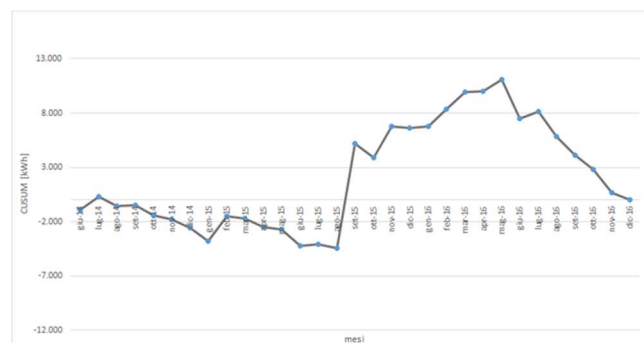


Figura 30 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la produzione di aria surpressa

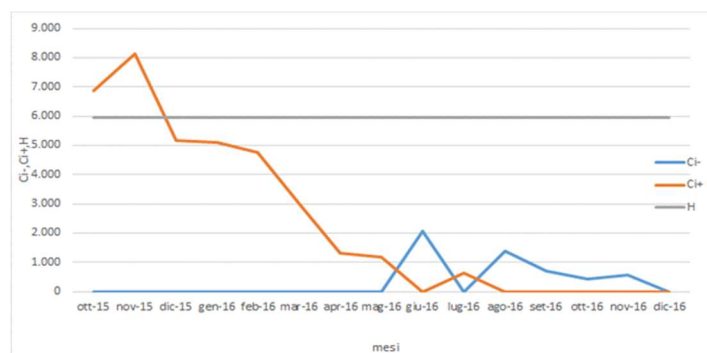


Figura 31 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per la produzione di aria surpressa

L'equazione caratteristica dei consumi di energia elettrica per la produzione di aria compressa riferita al periodo di setup è:

$$Y = 0,027X[kWh], \quad (4.17)$$

Dove X è l'aria surpressa prodotta in Nm³.

4.2.3.3 Impianti per la produzione di energia frigorifera

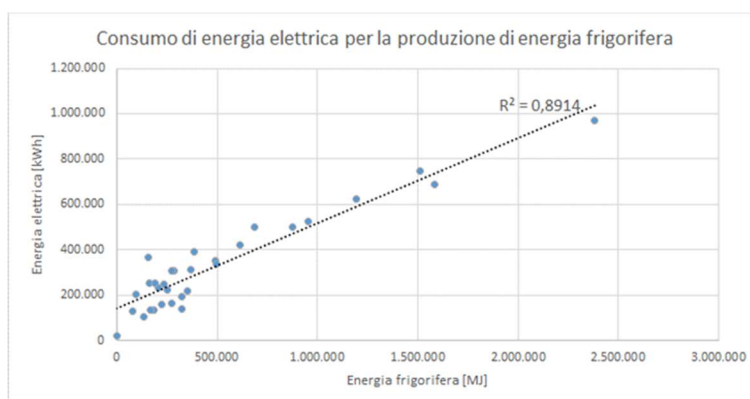


Figura 32 Diagramma di dispersione del consumo di EE per la produzione di energia frigorifera

Il diagramma di dispersione riferito al consumo elettrico negli impianti di produzione di energia frigorifera presenta un andamento lineare significativo, confermato dall'alto valore del coefficiente R.

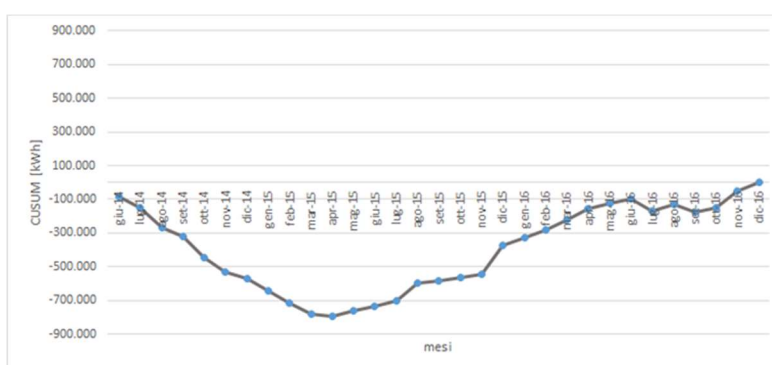


Figura 33 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la produzione di energia frigorifera

Per caratterizzare il consumo di energia elettrica rispetto all'energy driver energia frigorifera prodotta, è stato scelto giugno 2015-dicembre 2016 come periodo di riferimento, in riferimento al quale è stata valutata l'equazione caratteristica:

$$Y = 212.345 + 0,326X \text{ [kWh]} \quad (4.18)$$

Dove X è la quantità di energia frigorifera prodotta in MJ.

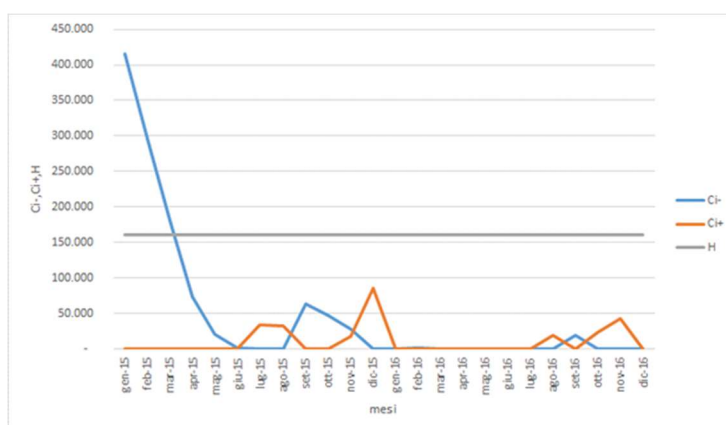


Figura 34 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per la produzione di energia frigorifera

4.2.3.4 Impianti per la distribuzione di acqua industriale

Gli impianti di distribuzione di acqua industriale consumano solo energia elettrica, e in riferimento a questo consumo è possibile constatare un andamento piuttosto lineare in funzione della portata distribuita. Inoltre, come evidenzia la figura 36, la curva del diagramma CuSum è caratterizzata da una pendenza negativa abbastanza marcata a partire da novembre 2015: nel corso degli ultimi mesi sono state attuate attività volte a diminuire i consumi di acqua industriale degli impianti (perlopiù raffreddamenti di processo); tali attività hanno permesso una significativa riduzione dei consumi elettrici. Il periodo di setup scelto è novembre 2015-dicembre 2016, con analisi e rappresentazioni ottenute cumulando i residui all'indietro.

L'equazione che caratterizza il consumo di energia elettrica per la distribuzione dell'acqua industriale è:

$$Y = 27.138 + 0,157X[kWh] \quad (4.19)$$

considerando X pari alla portata di acqua industriale distribuita in m3.

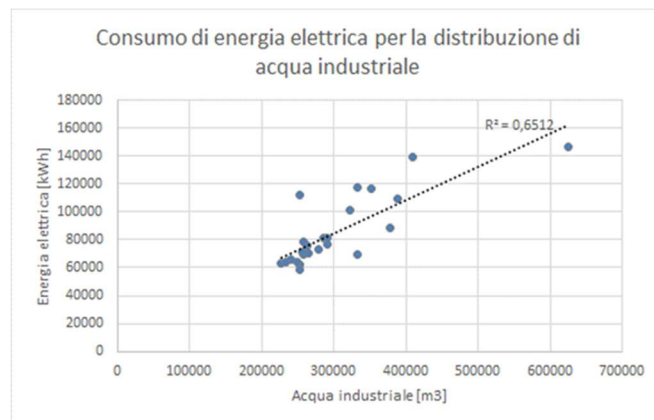


Figura 35 Diagramma di dispersione del consumo di EE per la distribuzione di acqua industriale

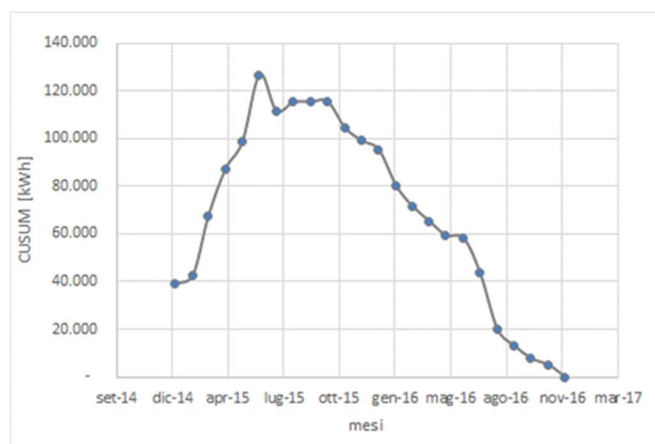


Figura 36 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la distribuzione di acqua industriale

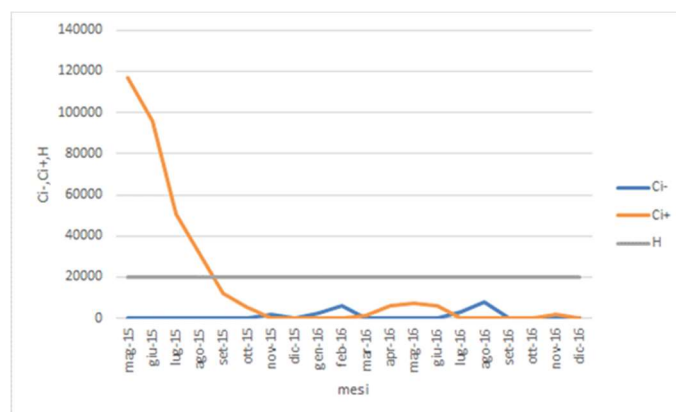


Figura 37 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per la distribuzione di acqua industriale

4.2.3.5 Impianto per il trattamento delle acque primarie

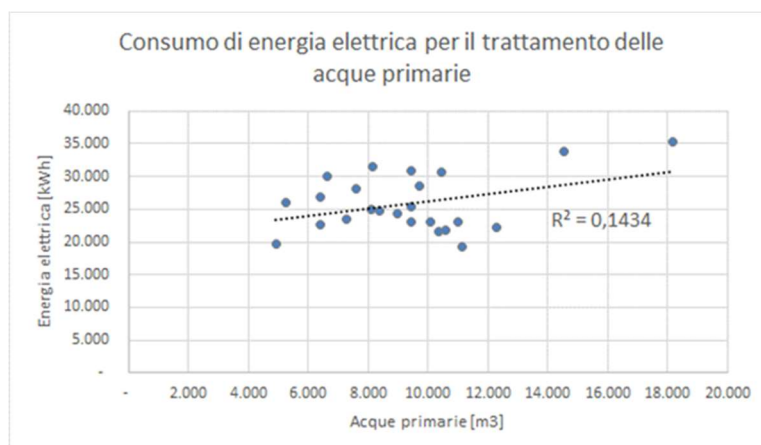


Figura 38 Diagramma di dispersione del consumo di EE per il trattamento delle acque primarie

Per quanto riguarda l'impianto di trattamento delle acque primarie, il consumo di energia elettrica è stato rapportato alla quantità di acqua trattata. Osservando la figura 34, e in seguito i diagrammi di dispersione riferiti alle altre tipologie di trattamento delle acque, è evidente una maggiore dispersione dei dati; inoltre, è da notare il valore rilevante dell'intercetta che rappresenta elevati consumi fissi indipendenti dalla produzione. Va ricordato che i trattamenti delle acque non rientrano

nella categoria dei processi strettamente dipendenti dalla fisica di ciò che succede: in questi casi, infatti, è più rilevante il contributo chimico-biologico dei processi.

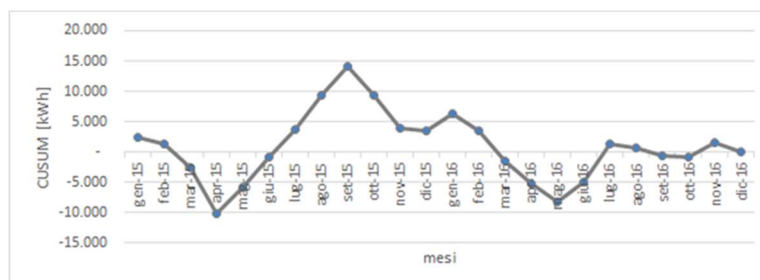


Figura 39 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per il trattamento delle acque primarie

Nel diagramma CuSum appaiono diversi picchi, relativi a funzionamenti a carico ridotto. Non si segnalano, comunque, interventi rilevanti sul sistema.

Il periodo di setup scelto è giugno 2016-dicembre 2016, a cui è riferita la seguente equazione caratteristica:

$$Y = 17.873 + 1,039X [kWh], \quad (4.20)$$

dove X rappresenta la portata di acqua trattata in m³.

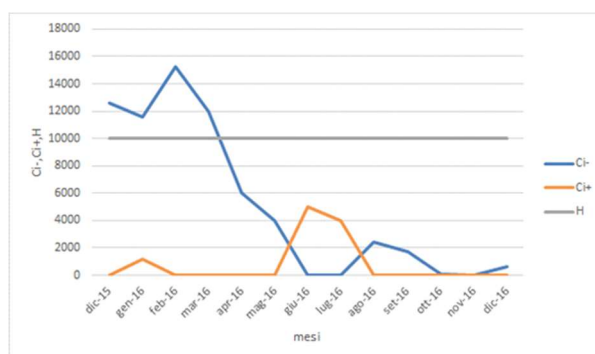


Figura 40 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per il trattamento delle acque primarie

4.2.3.6 Impianto per il trattamento delle acque reflue

Il diagramma di dispersione relativo ai consumi elettrici nell'impianto di trattamento delle acque reflue, è caratterizzato da dati significativamente dispersi e con andamento non eccessivamente lineare. Sebbene sia stato verificato, durante lo studio, che i consumi siano caratterizzati da un rapporto lineare in funzione delle concentrazioni di refluo, è stata mantenuta la portata di acqua come energy driver in quanto, ai fini della costruzione della matrice Input-Output, sono necessari i consumi specifici riferiti agli impianti analizzati.

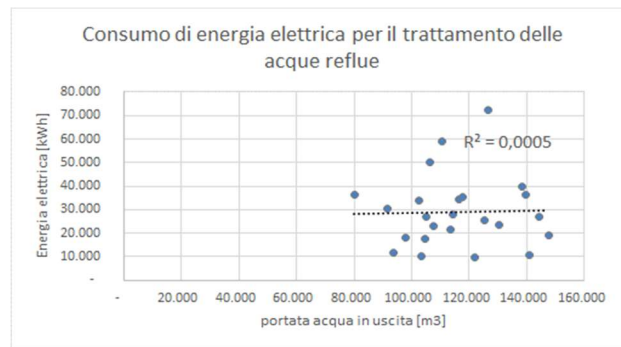


Figura 41 Diagramma di dispersione del consumo di EE per il trattamento delle acque reflue

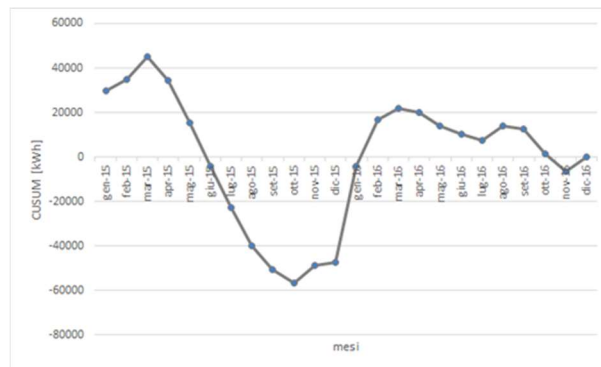


Figura 42 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per il trattamento delle acque reflue

Il periodo di setup è stato scelto a partire da aprile 2016 fino a dicembre dello stesso anno.

$$Y = 8.321 + 0,159X [kWh], \quad (4.21)$$

X è pari ai metri cubi di acqua in uscita dal trattamento.

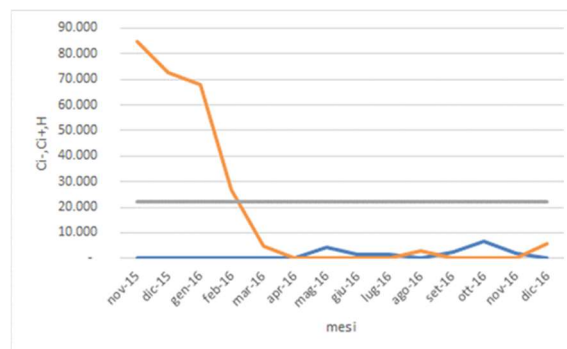


Figura 43 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per il trattamento delle acque reflue

4.2.3.7 Impianto per la depurazione delle acque di carrozzeria

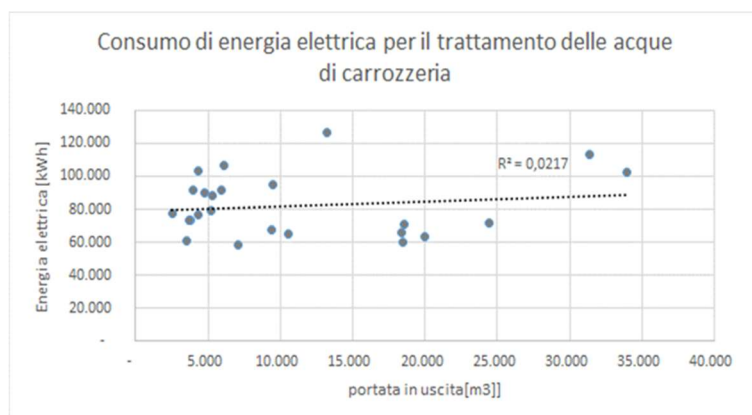


Figura 44 Diagramma di dispersione del consumo di EE per la depurazione delle acque di carrozzeria

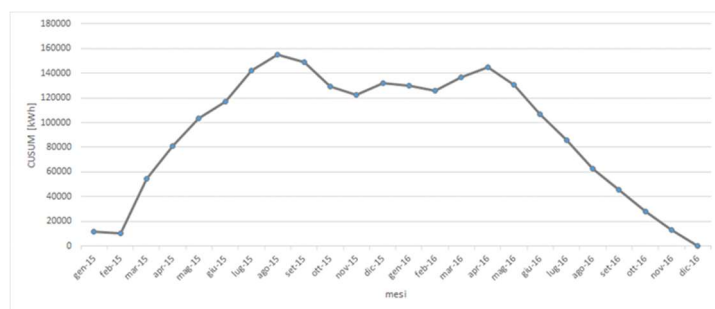


Figura 45 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la depurazione delle acque di carrozzeria

Il ragionamento sulla scarsa linearità tra consumo elettrico e portata trattata relativo alla figura 40, è lo stesso dell'impianto di trattamento delle acque reflue del paragrafo precedente.

Come mostrato nel grafico in figura 44, il consumo specifico nel 2016 diminuisce abbondantemente e si stabilizza dopo il periodo di cassa integrazione degli anni precedenti. Inoltre dopo maggio 2016 sono stati messi fuori servizio i due reattori verticali della sezione biologica dell'impianto, garantendo un'ulteriore riduzione dei consumi elettrici. Il periodo di riferimento scelto corrisponde dunque a maggio-dicembre 2016 e la relativa equazione caratteristica è:

$$Y = 59.148 + 0,397X[kWh], \quad (4.22)$$

dove X rappresenta i m3 di acqua in uscita post-trattamento.

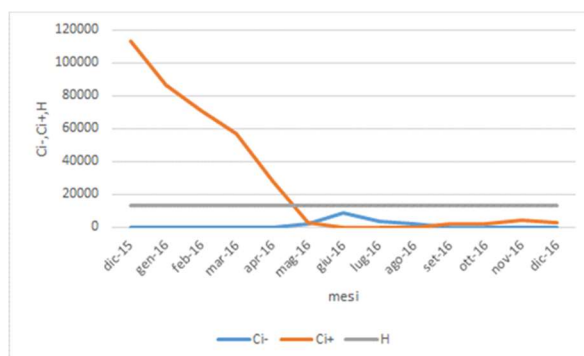


Figura 46 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per la depurazione delle acque di carrozzeria

4.2.3.8 Impianto per la rottura delle emulsioni oleose

Anche nel caso dell'impianto di rottura delle emulsioni oleose, il valore basso del coefficiente R segnala una scarsa linearità tra le variabili di consumo e produzione.

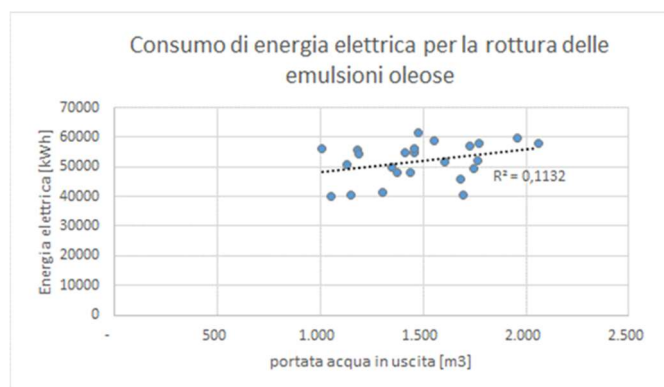


Figura 47 Diagramma di dispersione del consumo di EE per la rottura delle emulsioni oleose

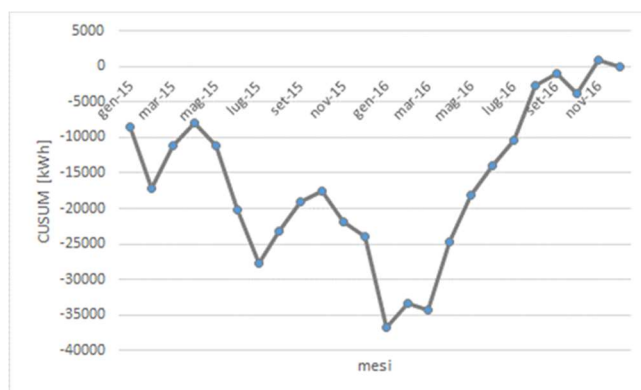


Figura 48 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la rottura delle emulsioni oleose

In figura 48 è evidente il picco in corrispondenza di febbraio 2016 dovuto a un forte incremento di assorbimento di energia elettrica a causa dell'utilizzo straordinario di due linee di trattamento invece che una, per permettere il trattamento delle elevate portate istantanee di quei mesi di ripresa dalla

cassa integrazione. Il periodo di riferimento è stato scelto proprio a partire da febbraio 2016. Inoltre, nel diagramma CuSum appare una stabilizzazione a ridosso dell'asse delle ascisse a partire da agosto 2016. Tale cambiamento del sistema è confermato dalla carta di controllo CuSum. La scelta del periodo di setup è risultata più giusta nel periodo febbraio 2016-agosto 2016, piuttosto che nei mesi seguenti. Inoltre, il numero di dati storici con cui costruire la baseline era maggiore.

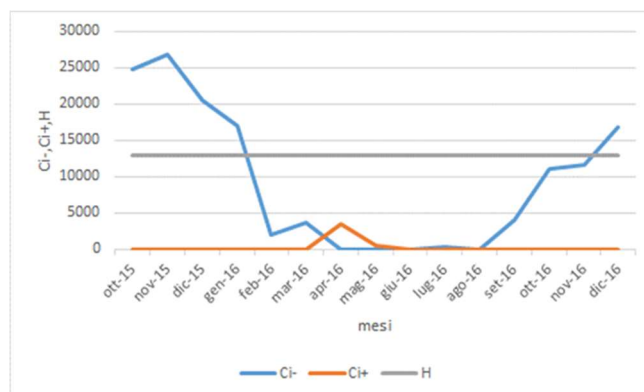


Figura 49 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per la rottura delle emulsioni oleose

I consumi elettrici relativi alla rottura delle emulsioni oleose sono descritti da:

$$Y = 54.860 + 1,314X [kWh], \quad (4.23)$$

con X pari alla portata d'acqua in uscita.

4.2.3.9 Impianti di produzione e distribuzione del calore

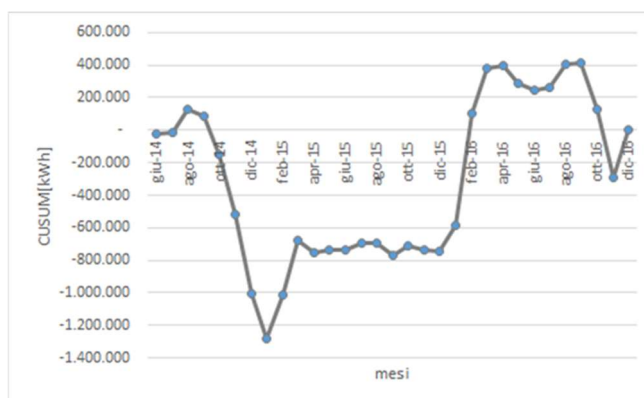


Figura 50 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la produzione e distribuzione del calore

Il periodo stabile più recente individuato sul diagramma è febbraio 2016-settembre 2016.

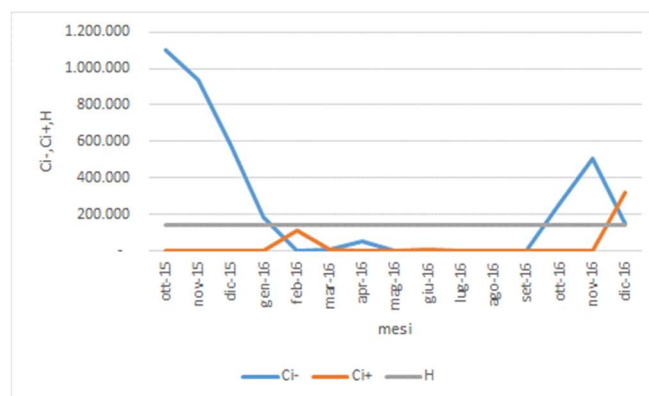


Figura 51 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di EE per la produzione e distribuzione del calore

L'equazione caratteristica del consumo di energia elettrica per la distribuzione del calore è multi-variabile e descritta da:

$$Y = 251.669 + 0,0025X + 3.589GG \text{ [kWh]}, \quad (4.24)$$

le cui variabili indipendenti sono X, quantità di vapore prodotto in MJ, e GG, i gradi giorno mensili che identificano la quantità di calore prodotto ad uso riscaldamento.

4.2.4 Elaborazione dei dati relativi al consumo di gas naturale

4.2.4.1 Impianti per la produzione del calore

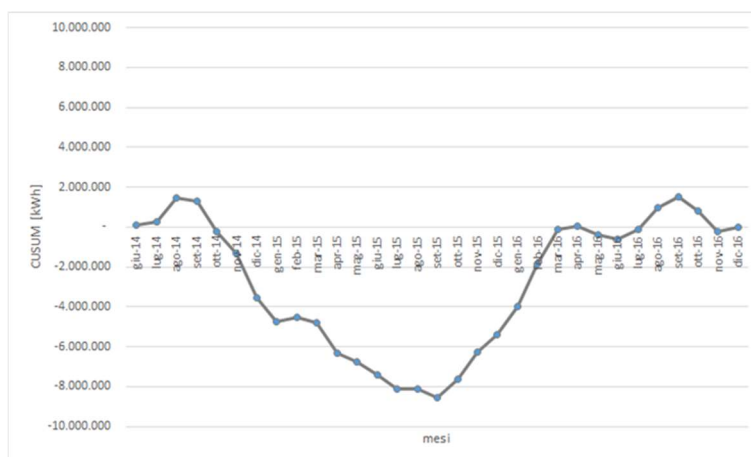


Figura 52 Diagramma CuSum relativo al consumo di gas naturale per la produzione di calore

Nel diagramma CuSum è evidente un cambiamento molto rilevante in corrispondenza di settembre 2015, mese corrispondente alla dismissione del cogeneratore che soddisfaceva, in gran parte, il carico termico. È interessante anche notare che, dismesso il cogeneratore, la curva tende nuovamente all'asse delle ascisse: infatti prima di settembre 2015 la centrale termica veniva mantenuta in

funzione come impianto di back-up per la produzione di vapore per la verniciatura, determinando consumi specifici elevati dovuti a carico molto basso.

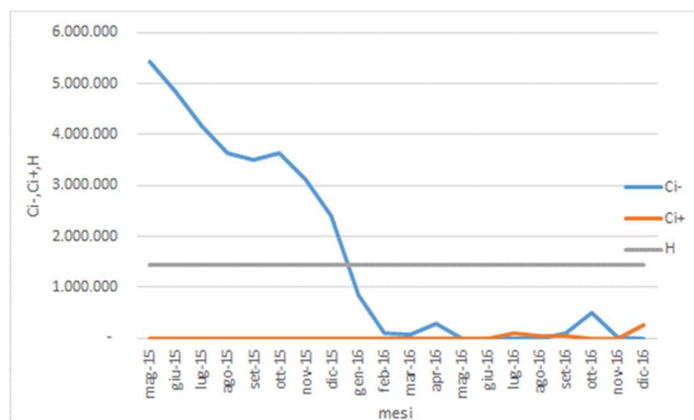


Figura 53 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di gas naturale per la produzione di calore

Il periodo di setup piu' adatto alla caratterizzazione del consumo di gas naturale è risultato essere da febbraio a dicembre 2016. L'equazione caratteristica del consumo di gas naturale per la produzione di calore è:

$$Y = 379.594 + 0,027X + 17.535GG[Sm3], \quad (4.25)$$

come prima X e GG rappresentano rispettivamente la quantità di vapore prodotto e i gradi giorno mensili. Y invece è il consumo di gas naturale in Sm3.

4.2.4.2 Impianto per la rottura delle emulsioni oleose

Si ricorda che parte del vapore tecnologico prodotto nelle centrali termoelettriche è utilizzato nell'impianto di rottura delle emulsioni oleose.

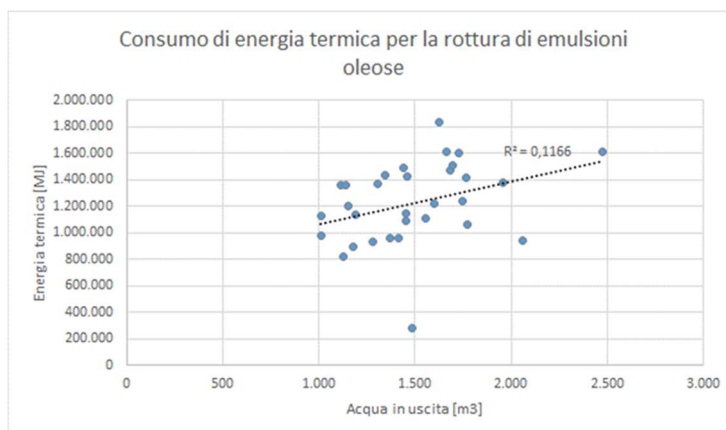


Figura 54 Diagramma di dispersione del consumo di calore per la rottura delle emulsioni oleose

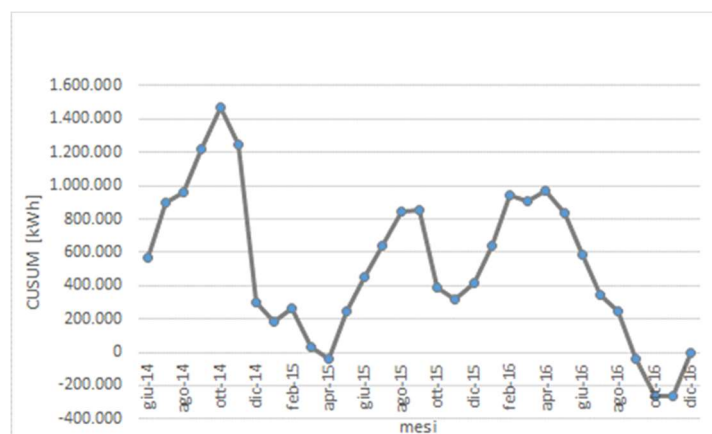


Figura 55 Diagramma CuSum relativo al consumo di EE per la rottura delle emulsioni oleose

In figura 55 è evidente il picco in corrispondenza di febbraio 2016-aprile 2016 dovuto all'utilizzo straordinario di due linee di trattamento invece che una, per permettere il trattamento delle elevate portate istantanee di quei mesi di ripresa dalla cassa integrazione. Tale evento ha determinato sicuramente un'instabilità significativa nel processo di caratterizzazione del sistema: il periodo di riferimento di maggiore stabilità è stato individuato sul diagramma tra aprile 2016 e ottobre 2016.

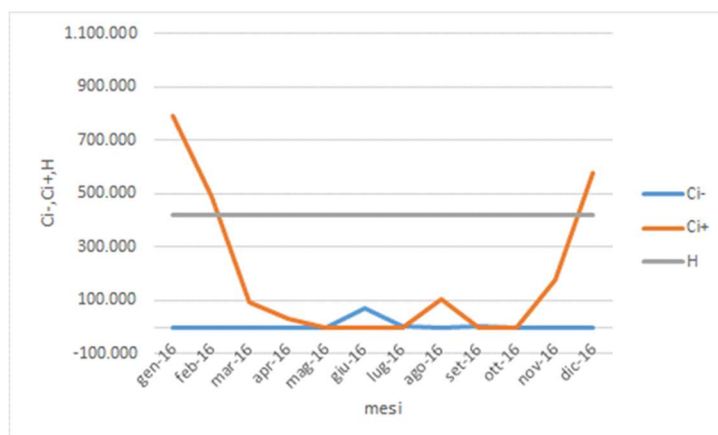


Figura 56 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di calore per la rottura delle emulsioni oleose

L'equazione caratteristica relativa al consumo di calore per la rottura delle emulsioni oleose è:

$$Y = 335.295 + 480,62X[MJ], \quad (4.26)$$

con X pari alla portata d'acqua trattata in uscita.

4.2.5 Elaborazione dei dati relativi al consumo di acqua industriale

Nei prossimi paragrafi, le equazioni caratteristiche riportate sono riferite al consumo di acqua industriale in m³, tale quantità è indicata con Y.

4.2.5.1 Impianti per la produzione di calore

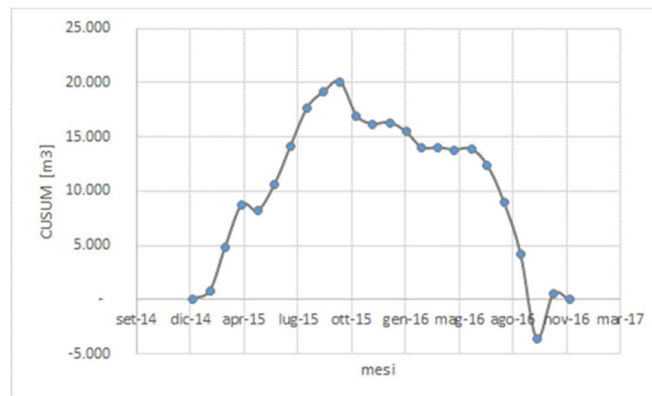


Figura 57 Diagramma CuSum relativo al consumo di acqua industriale per la produzione di calore

È evidente una marcata diminuzione di pendenza della curva del diagramma, corrispondente a un miglioramento di efficienza: tale cambiamento può essere attribuito agli interventi di ricircolo nelle centrali termiche avvenuti negli ultimi mesi, responsabili di un migliore utilizzo del vettore.

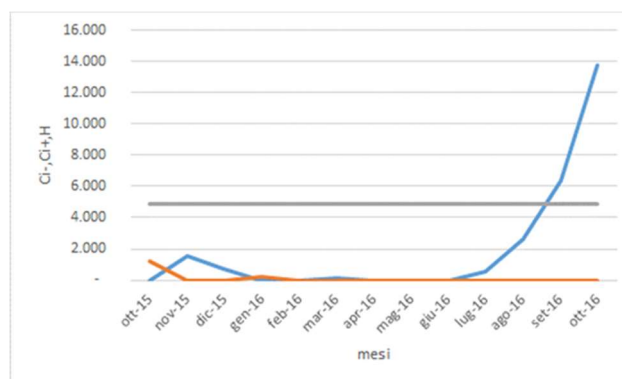


Figura 58 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di acqua industriale per la produzione di calore

Partendo dal periodo di setup ottenuto, si è ricavata la seguente equazione caratteristica:

$$Y = 11.224 + 4,6e - 05X + 14GG[m3]. \quad (4.27)$$

4.2.5.2 Impianti per la produzione di aria compressa

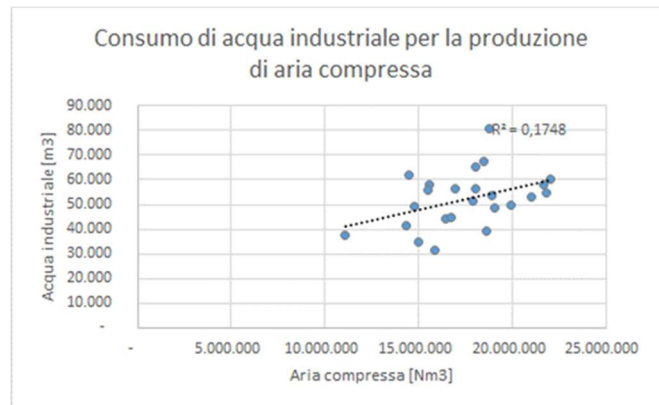


Figura 59 Diagramma di dispersione del consumo di acqua industriale per la produzione di aria compressa

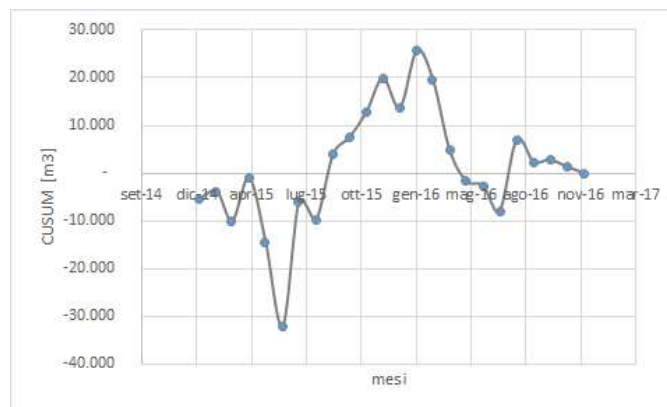


Figura 60 Diagramma CuSum relativo al consumo di acqua industriale per la produzione di aria compressa

In figura 60 è evidente, di nuovo, il tema già approfondito in precedenza: la richiesta di aria compressa durante le festività natalizie di dicembre 2015 è stata estremamente bassa, tale da causare un significativo aumento del consumo specifico di vettori primari rispetto alla produzione effettiva. Ai fini della determinazione del periodo di setup, è stato rilevato che il periodo più stabile e recente è settembre -dicembre 2016, come conferma la carta di controllo CuSum.

$$Y = 22.578 + 0,00161X[m3], \quad (4.28)$$

con X pari ai Nm3 di aria compressa prodotta.

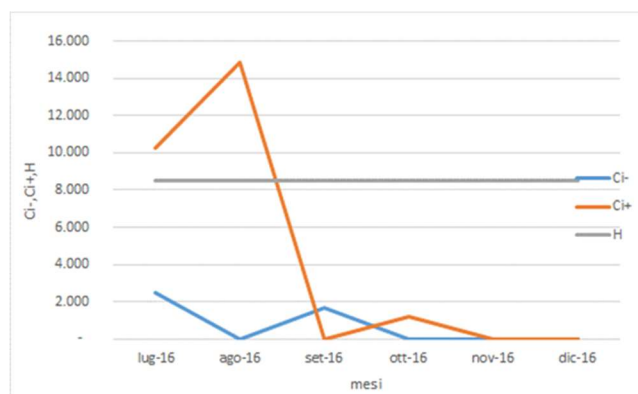


Figura 61 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di acqua industriale per la produzione di aria compressa

4.2.5.3 Impianti per la produzione di energia frigorifera

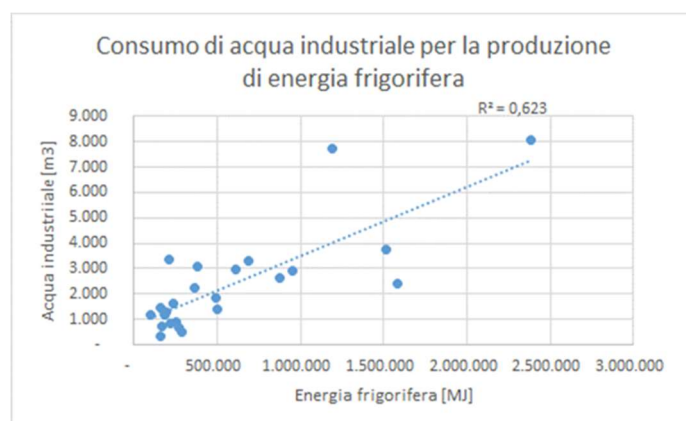


Figura 62 Diagramma di dispersione del consumo di acqua industriale per la produzione di energia frigorifera

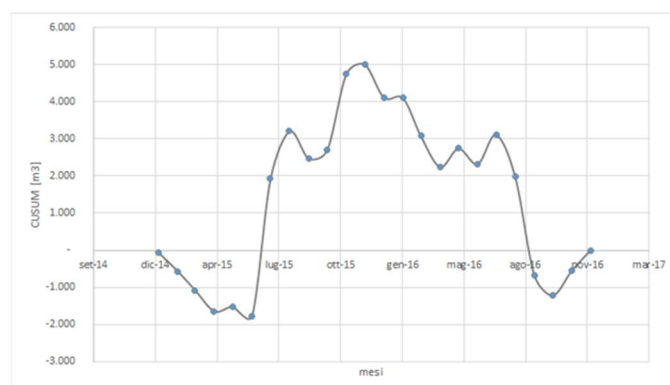


Figura 63 Diagramma CuSum relativo al consumo di acqua industriale per la produzione di energia frigorifera

Il periodo di setup individuato è gennaio 2016-luglio 2016, scelto per la sua stabilità ma anche per essere caratterizzato da un numero sufficiente di dati storici rispetto a quello piu' recente. L'equazione caratteristica ricavata è:

$$Y = 122 + 0,003X [m3], \quad (4.29)$$

X è la variabile indipendente che identifica la quantità di energia frigorifera prodotta in MJ.

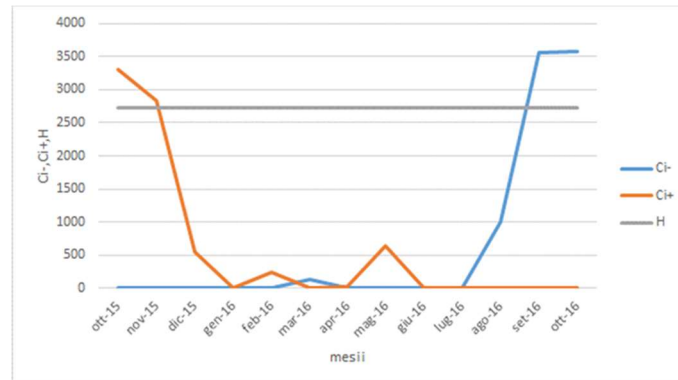


Figura 64 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di acqua industriale per la produzione di energia frigorifera

4.2.5.4 Impianto per la rottura delle emulsioni oleose

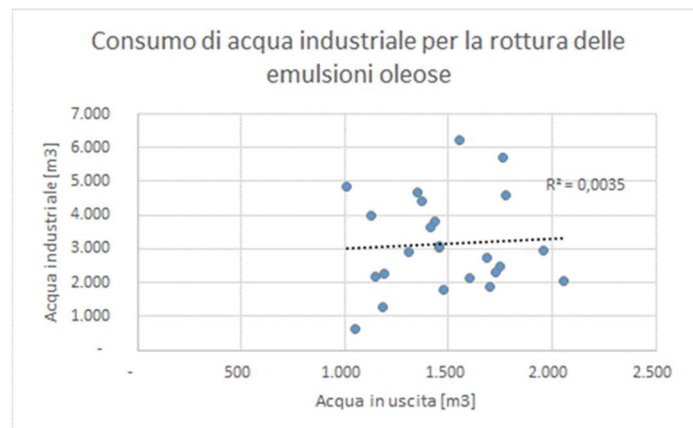


Figura 65 Diagramma di dispersione del consumo di acqua industriale per la rottura delle emulsioni oleose

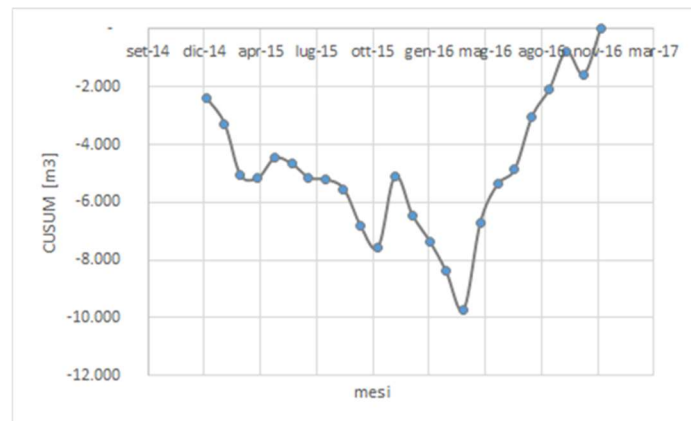


Figura 66 Diagramma CuSum relativo al consumo di acqua industriale per la rottura delle emulsioni oleose

Il periodo di setup scelto è maggio-dicembre 2016 e l'equazione caratteristica ottenuta è:

$$Y = 2.164 + 1,605X [m3]. \quad (4.30)$$

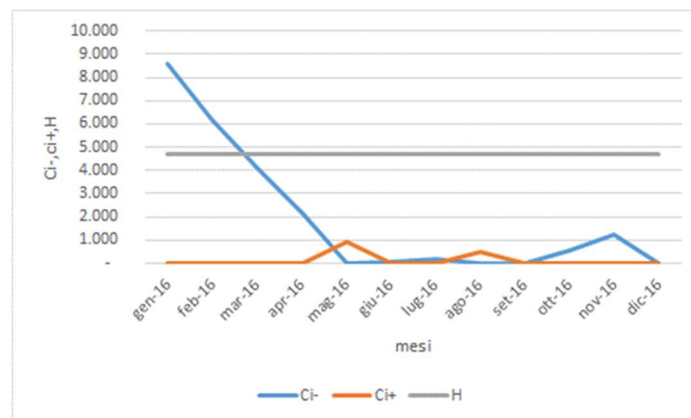


Figura 67 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di acqua industriale per la rottura delle emulsioni oleose

4.2.5.5 Impianto per il trattamento delle acque primarie

Per quanto riguarda il consumo di acqua industriale per la produzione di acqua demineralizzata, è stato stimato che la portata di acqua trattata uscente sia inferiore dell'1% rispetto alla quantità di acqua industriale entrante. L'equazione caratteristica è quindi descritta da:

$$Y = 1,01X [m3], \quad (4.31)$$

con X pari alla quantità di acqua demineralizzata uscente dall'impianto di trattamento.

4.2.6 Elaborazione dei dati relativi al consumo di aria compressa

4.2.6.1 Impianti per la produzione di calore

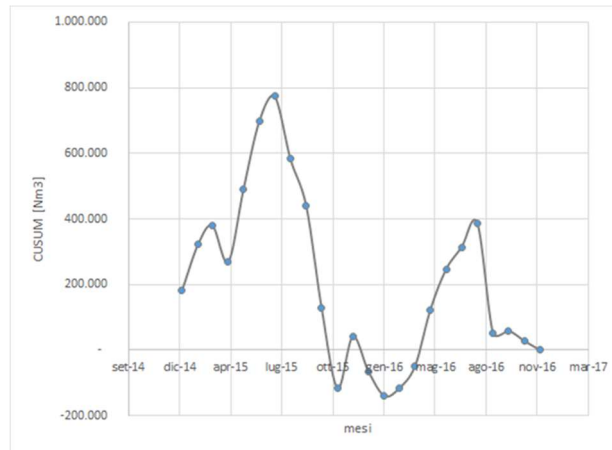


Figura 68 Diagramma CuSum relativo al consumo di aria compressa per la produzione di calore

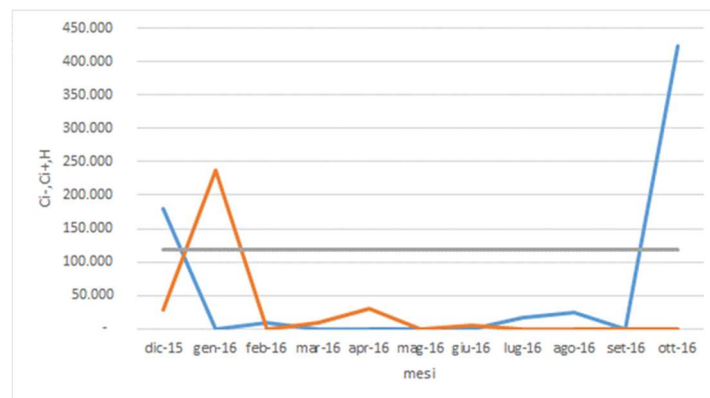


Figura 69 Carta di controllo CuSum relativa al consumo di aria compressa per la produzione di calore

L'equazione caratteristica del consumo di aria compressa per la produzione di calore è:

$$Y = 841.027 + 0,005X + 565GG[Nm3] \quad (4.32)$$

4.2.7 Perdite di trasformazione dell'energia elettrica

Il procedimento di identificazione della caratteristica energetica relativo al processo di trasformazione dell'energia elettrica è riassunto di seguito. In questo caso, per consumo, si intendono le perdite che caratterizzano i trasformatori. Poiché non è possibile la misurazione delle perdite attraverso apparecchi appositi, rendimenti e perdite stesse sono stati calcolati come in seguito. Si

precisa che il modello scelto rappresenta una stima semplicistica in quanto, mentre a monte dei trasformatori sono presenti contatori elettrici, a valle questi ultimi sono disponibili per il monitoraggio dei consumi di energia elettrica in bassa tensione solo in riferimento ad alcune utenze: infatti come già accennato, per gli impianti di distribuzione dell'acqua industriale tali consumi sono stati calcolati per differenza tra l'energia elettrica BT totale, stimata di seguito, e la somma dei consumi dei restanti impianti, non essendo presenti misuratori. Il modello utilizzato, dunque, è basato sull'ipotesi di massimo rendimento dei trasformatori.

Il rendimento di un trasformatore è definito come rapporto tra la potenza resa P_n e la potenza assorbita che include le perdite:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \text{Perdite}} \quad (4.33)$$

Le perdite dei trasformatori si distinguono in:

- Perdite a vuoto, dipendenti dalla tensione e praticamente indipendenti dal carico. Hanno sede nel nucleo ferromagnetico in cui è presente un flusso di induzione sinusoidale;
- Perdite a carico, presenti nei conduttori degli avvolgimenti. Dipendono dal quadrato della corrente che scorre nei conduttori stessi e quindi sono fortemente dipendenti dal carico: esistono solo se circola corrente di carico. Sono dovute principalmente alle perdite per effetto Joule nei conduttori.

Le perdite a vuoto a tensione nominale, P_0 , e le perdite a carico a corrente nominale, P_{cn} , sono entrambe stabilite durante il progetto del trasformatore.

I trasformatori da alta a media tensione considerati sono caratterizzati da:

- $P_0 = 19 \text{ kW}$;
- $P_{cn} = 115 \text{ kW}$.

Mentre i trasformatori da media a bassa tensione:

- $P_0 = 4 \text{ kW}$;
- $P_{cn} = 16 \text{ kW}$.

Si definisce R il rapporto tra perdite a carico nominale, P_{cn} , e perdite a vuoto a tensione nominale, P_0 :

$$R = \frac{P_{cn}}{P_0} \quad (4.34)$$

Tale rapporto vale 6 nel caso dei trasformatori AT/MT e 4 per quelli MT/BT.

Il rendimento di un trasformatore dipende dal suo fattore di carico; questo è definito come il rapporto in percentuale tra la potenza resa e la potenza resa nominale assunta l'ipotesi di massimo rendimento:

$$X^2 = \frac{P_0}{P_{cn}} \quad (4.35)$$

Quindi,

$$X = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cn}}} = \sqrt{\frac{1}{R}} \quad (4.36)$$

pari a 41% nel caso AT/MT e 50% per i trasformatori MT/BT.

Il rendimento è definito dalla seguente equazione:

$$\eta = \frac{X * N \cos \varphi}{X * N \cos \varphi + P_{cn} * X^2} \quad (4.37)$$

Dove N è la potenza nominale espressa in VA, $\cos \varphi$ è il fattore di potenza ed è pari a 0,9.

Le perdite totali invece sono definite dalla somma:

$$Perdite = P_0 + P_{cn} * X^2 \quad (4.38)$$

	AT/MT	MT/BT
N[VA]	25.000	2.000
cosφ	0,9	0,9
P0[kW]	19	4
Pcn[kW]	115	16
R	6	4
X	41%	50%
η	99,6%	99,1%
Perdite [kW]	38	8

Tabella 19 Rendimenti e perdite dei trasformatori

Successivamente, per la definizione delle perdite di distribuzione, sono state considerate le caratteristiche dei cavi:

- Lunghezza=1km;
- Resistività=0,2Ω/km.

Le perdite totali sono state calcolate dal contributo delle perdite di distribuzione e quelle di trasformazione e sono risultate pari a circa 1,3%. È stato scelto, ai fini di un'analisi cautelativa, di considerare le perdite totali costanti e pari a 1,5%.

La caratteristica energetica che riassume il risultato ottenuto è:

$$Y = 1,015X [kWh] \quad (4.39)$$

4.3 Fase di monitoraggio

Successivamente all'analisi dei dati storici effettuata nel paragrafo precedente, le equazioni di baseline individuate vengono studiate nella fase di monitoraggio per verificarne l'effettiva correttezza e significatività. I mesi utilizzati come periodo di monitoraggio sono i primi quattro del 2017 per cui, al momento dell'analisi si disponeva dei reali dati di consumo. Anche in questa fase sono state scelte le carte di controllo CuSum tabulari come strumento di analisi. In particolare le equazioni caratteristiche dei consumi ottenute sono state utilizzate per il calcolo dei consumi previsti relativi agli energy drivers degli impianti considerati. Il modello CuSum ha permesso di verificare se gli scostamenti tra i consumi previsti e quelli effettivi rientrassero nel limite.

Come rappresentato nelle immagini seguenti, è possibile osservare che gli scostamenti dei consumi effettivi rispetto a quelli previsti rientrino nel limite H: tale risultato è stato ottenuto per i consumi di tutti i vettori primari in riferimento a ciascun impianto analizzato.

4.3.1 Monitoraggio dei consumi di energia elettrica

4.3.1.1 Impianti per la produzione di aria compressa

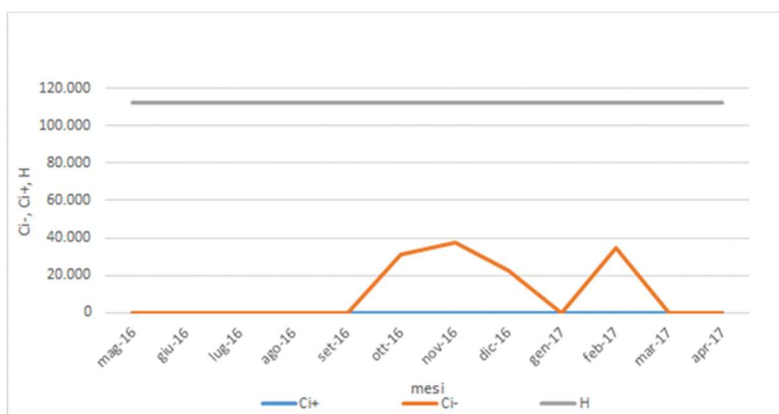


Figura 70 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per la produzione di aria compressa

4.3.1.2 Impianti per la produzione di aria surpressa

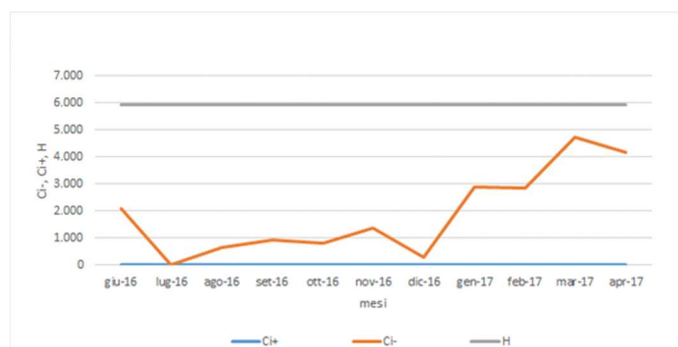


Figura 71 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per la produzione di aria surpressa

4.3.1.3 Impianti per la produzione di energia frigorifera

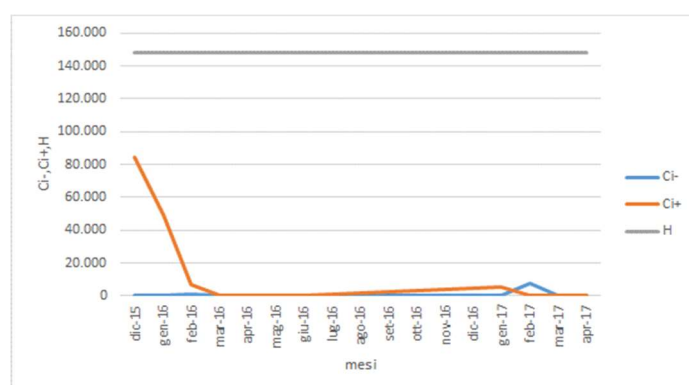


Figura 72 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per la produzione di energia frigorifera

4.3.1.4 Impianti per la distribuzione di acqua industriale

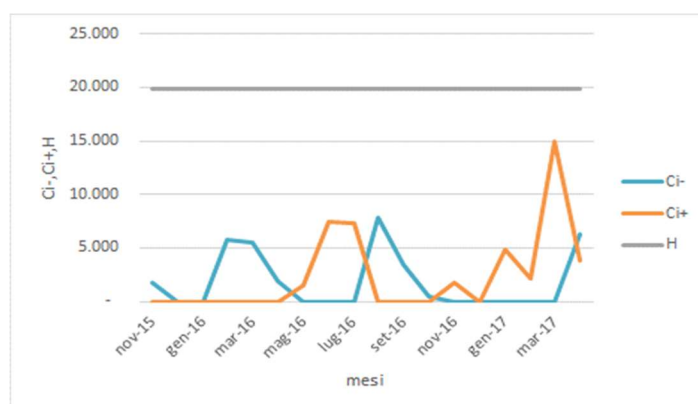


Figura 73 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per la distribuzione di acqua industriale

4.3.1.5 Impianto per il trattamento di acque primarie

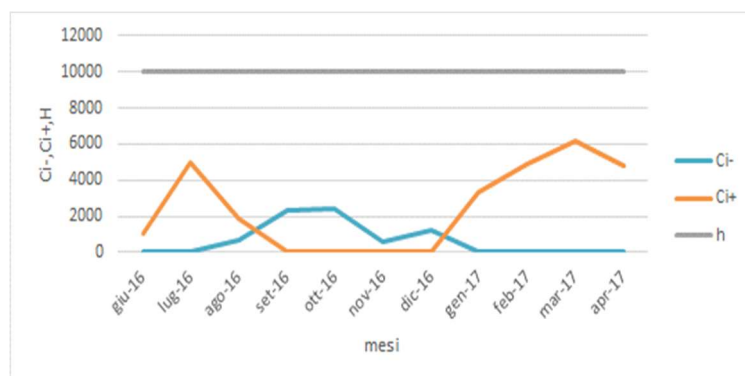


Figura 74 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per il trattamento delle acque primarie

4.3.1.6 Impianto per il trattamento delle acque reflue

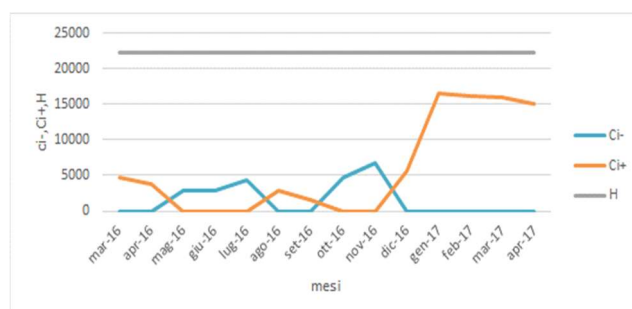


Figura 75 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per il trattamento delle acque reflue

4.3.1.7 Impianto per la depurazione delle acque di carrozzeria

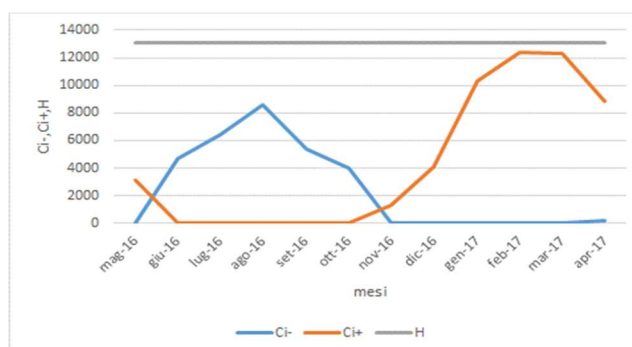


Figura 76 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per la depurazione delle acque di carrozzeria

4.3.1.8 Impianto per la rottura delle emulsioni oleose

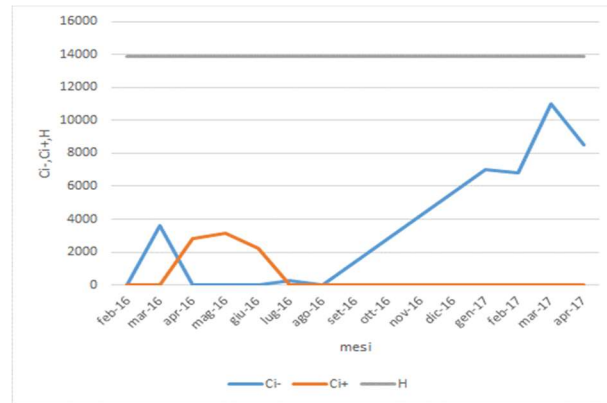


Figura 77 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per la rottura delle emulsioni oleose

4.3.1.9 Impianti per la produzione e distribuzione di calore

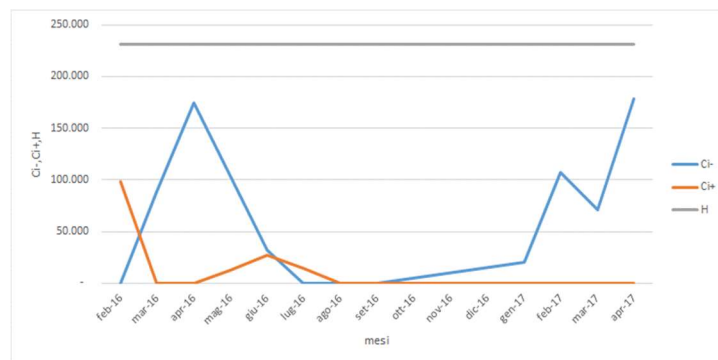


Figura 78 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di energia elettrica per la produzione di calore

4.3.2 Monitoraggio dei consumi di gas naturale

4.3.2.1 Impianti per la produzione di calore

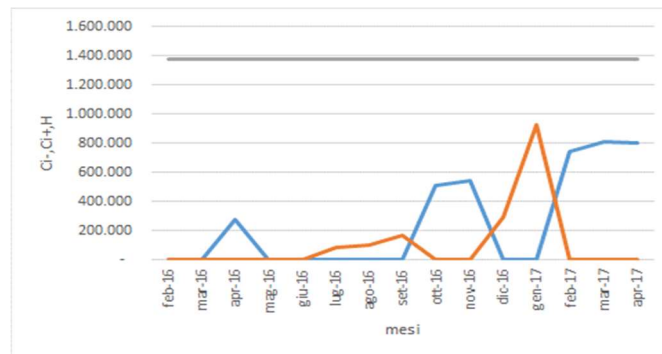


Figura 79 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di gas naturale per la produzione di calore

4.3.2.2 Impianto per la rottura delle emulsioni oleose

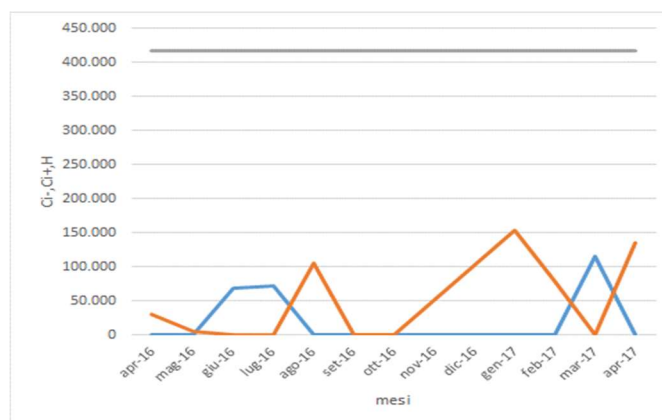


Figura 80 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di calore per la rottura delle emulsioni oleose

4.3.3 Monitoraggio dei consumi di acqua industriale

4.3.3.1 Impianti per la produzione di calore

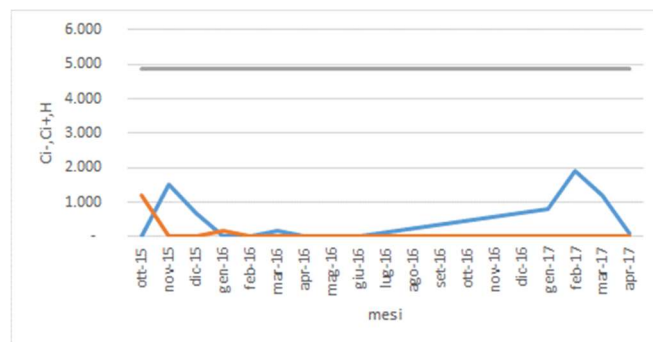


Figura 81 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di acqua industriale per la produzione di calore

4.3.3.2 Impianti di produzione di aria compressa

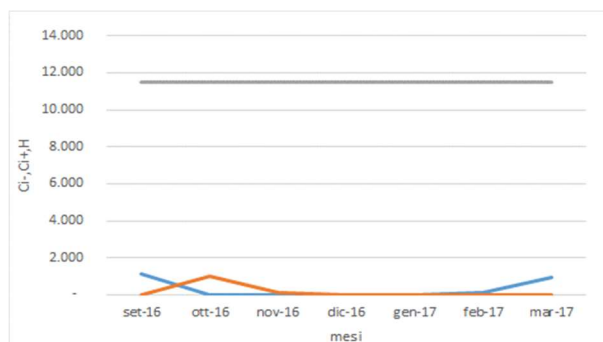


Figura 82 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di acqua industriale per la produzione di aria compressa

4.3.3.3 Impianti di produzione di energia frigorifera

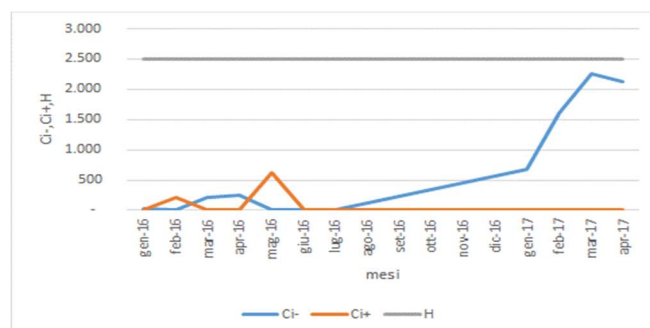


Figura 83 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di acqua industriale per la produzione di energia frigorifera

4.3.3.4 Impianti di rottura delle emulsioni oleose

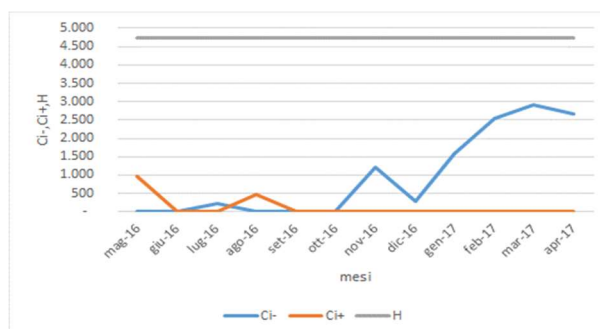


Figura 84 Carta di controllo CuSum per il monitoraggio del consumo di acqua industriale per la rottura delle emulsioni oleose

5 Elaborazione del modello Input-Output

La teoria ed il significato del metodo Input-output sono stati approfonditi nel secondo capitolo e si è accennato riguardo alla possibilità dell'utilizzo del modello come strumento di analisi dei flussi energetici.

L'applicazione del modello Input-Output come strumento di analisi energetica e di valutazione economica riguarda uno stabilimento reale costituito da diversi tipi di impianti, scelta che ha permesso di verificare in modo completo e articolato la validità del metodo: lo stabilimento studiato in questo elaborato è particolarmente adatto alla valutazione, in quanto caratterizzato da diverse tipologie impiantistiche e da una rete di consumo e produzione estremamente complessa e difficilmente indagabile con metodi standard.

L'obiettivo di questo capitolo è la costruzione di una matrice che descriva il sistema di generazione in modo completo e che permetta di confermare la validità del metodo Input-Output per lo scopo prestabilito. I flussi studiati nel modello non sono più flussi monetari ma vettori energetici: gli inputs sono i vettori entranti nel sistema, rappresentato come una black box; l'insieme dei vettori prodotti, invece, definiscono gli outputs che soddisfano in parte la domanda finale e in parte la domanda intermedia che ne garantisce la producibilità.

La costruzione della matrice poggia sulla conoscenza minuziosa dello stabilimento, i cui dettagli sono stati raccolti nel terzo capitolo, e sul significato dei risultati della caratterizzazione energetica del quarto capitolo.

5.1 Definizione del sistema di generazione e dei flussi energetici

Il primo passo per l'applicazione del metodo è la descrizione dettagliata del sistema di generazione oggetto di analisi. L'aspetto più importante è l'identificazione dei flussi energetici che ne fanno parte, distinguendoli in:

- Inputs: vettori primari necessari per il soddisfacimento della domanda totale;
- Outputs: vettori energetici che comprendono la produzione destinata all'autoconsumo, scambi intermedi tra i settori, e la domanda finale del Cliente.

Per l'identificazione precisa dei flussi in entrata e in uscita, il sistema di generazione è stato rappresentato facendo riferimento al modello black box. Un modello black box descrive il comportamento del sistema e la reazione in uscita (output) del sistema stesso relativamente ad una determinata sollecitazione in ingresso (input). L'obiettivo del modello Input-Output è quello di osservare un sistema specifico nel suo comportamento esterno permettendo la determinazione dei vettori primari necessari al soddisfacimento della domanda, cioè quantificare l'input necessario conoscendo soltanto l'output richiesto. Nella figura seguente è presente la rappresentazione del sistema di generazione come black box.

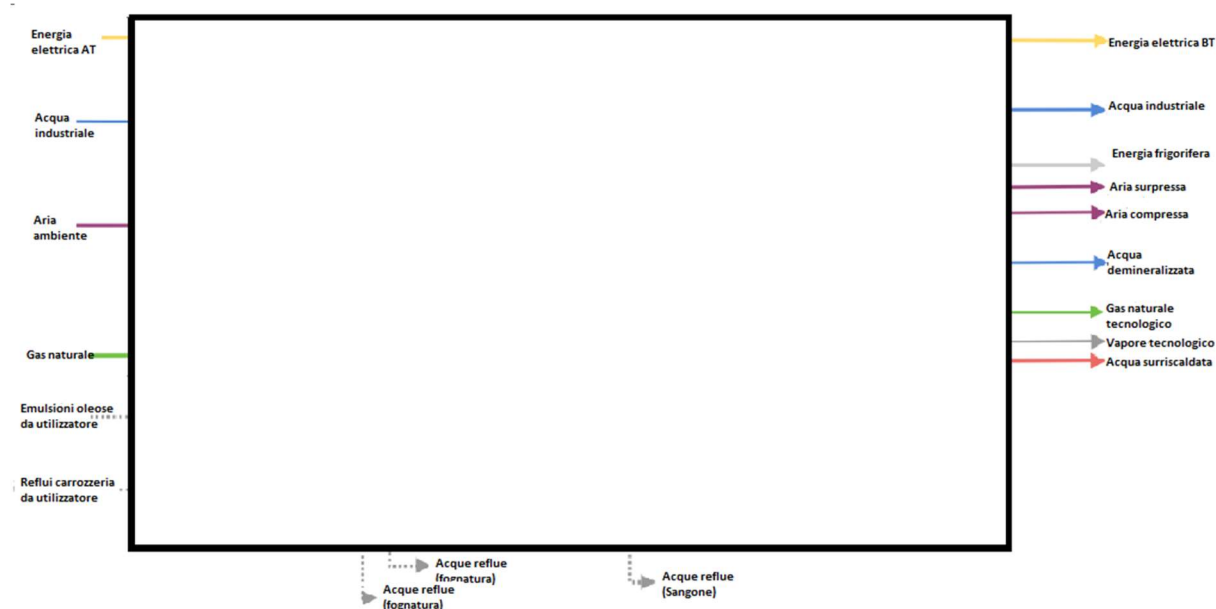


Figura 85 Modello black box del sistema di generazione

Precisamente, i flussi energetici in figura vengono così classificati:

Inputs

- Energia elettrica in alta tensione [kWh]
- Acqua industriale [m3]
- Aria ambiente [Nm3]
- Gas naturale [Sm3]
- Emulsioni oleose [m3]
- Reflui carrozzeria [m3]

È importante specificare che le portate riferite alle emulsioni oleose e ai reflui di carrozzeria derivano dal sistema di utilizzazione ma vengono trattati nel sistema di generazione: più precisamente, la generazione fa riferimento ai centri che acquistano e consumano i vettori primari per la trasformazione e generazione di vettori energetici destinati agli utilizzatori; il centro di utilizzazione, invece, è responsabile del consumo dei vettori finali ed è identificato, in questo elaborato, nel *Cliente*. Tutti gli impianti descritti finora costituiscono il sistema di generazione. Come accennato, le portate delle emulsioni oleose e i reflui di carrozzeria derivano dagli utilizzatori, ma dal punto di vista del sistema di generazione, essi sono inputs da trattare, depurare e smaltire che producono, dunque, un autoconsumo di energia elettrica, acqua industriale e gas naturale, all'interno dello stabilimento.

Outputs finali

- Energia elettrica in bassa tensione [kWh]
- Acqua industriale [m3]
- Energia frigorifera [MJ]
- Aria surpressa [Nm3]
- Aria compressa [Nm3]
- Acqua demineralizzata [m3]
- Gas naturale tecnologico [Sm3]
- Vapore tecnologico [MJ]
- Acqua surriscaldata [MJ]
- Acque reflue uscenti da IREO [m3]
- Acque reflue uscenti da TAR [m3]
- Acque reflue uscenti da IDAC [m3]

Per quanto riguarda gli outputs finali è bene distinguere i vettori prodotti per il soddisfacimento della domanda del cliente dai flussi smaltiti nella fognatura (acque reflue uscenti dagli impianti di rottura delle emulsioni oleose e di depurazione delle acque di carrozzeria) e nel Sangone (acque reflue uscenti dall'impianto di trattamento delle acque reflue). Nello schema tali vettori sono facilmente

distinguibili dalla posizione d'uscita: verso destra, i prodotti destinati al soddisfacimento della domanda delle utenze; verso il basso i "rifiuti" da smaltire.

Per la costruzione di una matrice che descriva lo stabilimento in analisi nel suo complesso e che sia valida per relazionare in modo immediato entrate e uscite, è necessario analizzare in modo minuzioso e dettagliato ciò che accade all'interno del sistema di generazione: come è già stato spiegato in precedenza, infatti, il principio fondamentale su cui poggia il modello di Leontief è la considerazione delle interdipendenze dei settori presenti. Tale aspetto è rispettato nella figura seguente, la cui rappresentazione è stata resa possibile da una conoscenza approfondita dello stabilimento in ogni sua parte (si faccia riferimento al Capitolo 3).

I blocchi presenti all'interno della *White Box* in figura 84, rappresentano gli impianti descritti nel Capitolo 3. Il modello White box permette la descrizione di un sistema di cui si conoscono i componenti e i relativi funzionamenti. Inoltre la figura seguente è arricchita dai fattori di consumo specifico ottenuti nel capitolo precedente: l'obiettivo è quello di fornire una visione chiara della relazione tra inputs e outputs relativa ad ogni blocco impiantistico e di rendere più immediata la comprensione della matrice ottenuta successivamente.

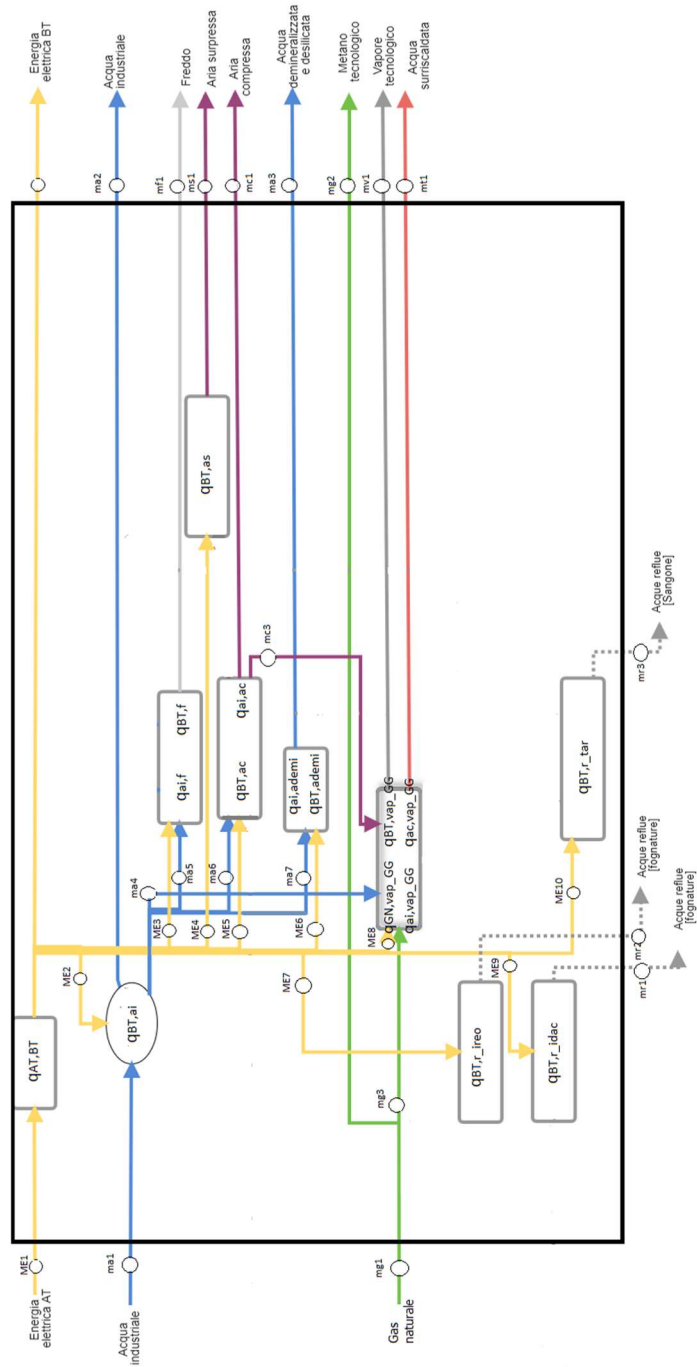


Figura 86 Modello white box del sistema di generazione con consumi specifici in evidenza

5.2 Costruzione della matrice Input-Output

La tavola Input-Output correla i vettori in input e in output al fine di descrivere completamente ed integralmente il funzionamento e gli scambi tra gli impianti.

Le righe della colonna più a sinistra definiscono gli inputs, mentre le colonne della riga più in alto costituiscono gli outputs. Si distinguono tra gli inputs i vettori primari acquistati dall'esterno e gli inputs intermedi, cioè i prodotti autoconsumati negli impianti interni allo stabilimento al fine di generare gli outputs. Tra vettori uscenti si differenziano gli outputs intermedi, che diventano inputs intermedi di autoconsumo, e prodotti finali destinati al soddisfacimento della domanda del Cliente. Più precisamente, vengono identificati con la lettera i i vettori primari in ingresso, con u gli outputs intermedi, con d la domanda finale.

La tavola è costituita da consumi specifici q_{kj} , che descrivono la quantità di vettore k per la produzione di un'unità del vettore j , dove k identifica le righe e j le colonne, e, nell'ultima colonna, dai valori di domanda finale da soddisfare.

	i_eeAT	i_GN	i_ai	u_eeBT	u_vap	u_GG	u_ademi	u_f	u_ac	u_as	u_tar	u_ireo	u_idac	d
i_eeAT	0	0	0	qAT,BT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i_GN	0	0	0	0	qGN,vap	qGN,GG	0	0	0	0	0	0	0	d_GN
i_ai	0	0	0	0	qai,vap	qai,GG	qai,ademi	qai,f	qai,ac	0	0	qai,r_ireo	0	d_ai
u_eeBT	0	0	qBT,ai	0	qBT,vap	qBT,GG	qBT,ademi	qBT,f	qBT,ac	qBT,as	qBT,r_tar	qBT,r_ireo	qBT,r_idac	d_BT
u_vap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	qvap,r_ireo	0	d_vap
u_GG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_GG
u_ademi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_ademi
u_f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_f
u_ac	0	0	0	0	qac,vap	qac,GG	0	0	0	0	0	0	0	d_ac
u_as	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_as
u_tar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_tar
u_ireo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_ireo
u_idac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_idac

Tavola 20 Tavola Input-Output dei vettori energetici

Nella tavola rappresentata, le sigle hanno i seguenti significati:

- *eeAT* energia elettrica in alta tensione;
- *GN* gas naturale;
- *ai* acqua industriale;
- *eeBT* energia elettrica in bassa tensione;
- *vap* vapore tecnologico;
- *GG* gradi giorno;
- *ademi* acqua demineralizzata;
- *f* energia frigorifera;
- *ac* aria compressa;

- *as* aria surpressa;
- *tar* reflui uscenti dall'impianto di trattamento delle acque reflue;
- *ireo* reflui uscenti dall'impianto di rottura delle emulsioni oleose;
- *idac* reflui uscenti dall'impianto di depurazione delle acque di carrozzeria.

È necessario soffermarsi su alcuni punti:

- l'aria ambiente, vettore entrante in figura 85, non è stata considerata nella tavola Input-Output: dal punto di vista energetico ed economico, infatti, il costo ed il consumo relativi a tale vettore non sono rilevanti;
- come già accennato, i tre vettori uscenti che identificano i reflui degli impianti di trattamento delle acque reflue, di depurazione delle acque di carrozzeria e di rottura delle emulsioni oleose, non costituiscono una reale “domanda”, ma vengono trattati come outputs di cui sia possibile ipotizzare un valore. Le tre portate considerate sono risultate le più delicate dal punto di vista dell'analisi, in quanto prodotte dall'utilizzatore ma trattate e smaltite dal sistema di generazione e responsabili, quindi, di autoconsumi all'interno dello stabilimento. Il metodo che ha permesso di raggiungere i risultati più precisi è stato quello di ipotizzare quanti reflui si preveda di smaltire (tra fognature e Sangone) successivamente ai trattamenti, anche in accordo ai parametri del Decreto Legislativo 152/06; inoltre, si ricorda che le equazioni caratteristiche dei consumi di tali impianti sono riferite alle portate di acque reflue uscenti.

Si sottolinea anche che l'impianto di depurazione delle acque di carrozzeria è caratterizzato da dimensioni e consumi molto limitati, mentre l'impianto di trattamento delle acque reflue, nonostante tratti elevate portate, si distingue per avere consumi specifici molto bassi: questa precisazione ha lo scopo di evidenziare la scarsa significatività di tali impianti rispetto allo stabilimento globale.

- L'elemento definito come d_{GG} , “domanda di gradi giorno”, è da intendersi come la quantità di calore ad uso riscaldamento relativa ai gradi giorni del mese considerato. Per limitare gli errori di approssimazione, i consumi per la produzione di calore di riscaldamento sono stati caratterizzati direttamente in riferimento ai gradi giorno.

Si faccia adesso riferimento alla costruzione della tavola: considerando e leggendo la riga k , ad esempio, si ottiene l'informazione su quali vettori energetici concorrano a produrre la risorsa k : la somma degli elementi della riga considerata fornisce la quantità totale di outputs che tale elemento deve soddisfare, considerando sia la domanda intermedia che quella finale. Analizzando la matrice nel senso delle colonne e focalizzandosi sulla colonna j , essa indica le quantità dei singoli inputs necessari alla produzione dell'output j . Si consideri, ad esempio, la seconda riga riferita al consumo di gas naturale: il gas naturale acquistato da SNAM viene utilizzato per la produzione di vapore

tecnologico, $q_{GN,vap}$, per la generazione di calore in funzione dei gradi giorno, $q_{GN,GG}$, e per il soddisfacimento della domanda di gas naturale tecnologico del Cliente, d_{GN} . A sua volta il vapore tecnologico prodotto, quinta riga, viene ceduto al Cliente, d_{vap} , ma anche destinato all'IREO, dove viene sfruttato per la rottura delle emulsioni oleose, $q_{vap,IREO}$. Considerando invece la quinta colonna, si ottengono informazioni su quali vettori siano necessari per l'ottenimento e la distribuzione del vapore tecnologico: gas naturale ($q_{GN,vap}$), energia elettrica in bassa tensione ($q_{BT,vap}$), acqua industriale ($q_{AI,vap}$), aria compressa ($q_{ac,vap}$).

Gli inputs, gli outputs e le relative relazioni descritte finora sono strettamente dipendenti tra loro e possono essere riassunti dalle seguenti equazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{AT} = q_{AT,BT} u_{BT} \\ i_{GN} = q_{GN,vap} u_{vap} + q_{GN,GG} u_{GG} + d_{GN} \\ i_{ai} = q_{ai,vap} u_{vap} + q_{ai,GG} u_{GG} + q_{ai,ademi} u_{ademi} + q_{ai,f} u_f + q_{ai,ac} u_{ac} + q_{ai,ireo} u_{ireo} + d_{ai} \\ u_{BT} = q_{BT,ai} u_{ai} + q_{BT,vap} u_{vap} + q_{BT,GG} u_{GG} + q_{BT,ademi} u_{ademi} + q_{BT,f} u_f + q_{BT,ac} u_{ac} + \dots \\ \dots + q_{BT,as} u_{as} + q_{BT,tar} u_{tar} + q_{BT,ireo} u_{ireo} + q_{BT,idac} u_{idac} + d_{BT} \\ u_{vap} = q_{vap,ireo} u_{ireo} + d_{vap} \\ u_{GG} = d_{GG} \\ u_{ademi} = d_{ademi} \\ u_f = d_f \\ u_{ac} = q_{ac,vap} u_{vap} + q_{ac,GG} u_{GG} + d_{ac} \\ u_{as} = d_{as} \\ u_{tar} = d_{tar} \\ u_{ireo} = d_{ireo} \\ u_{idac} = d_{idac} \end{array} \right.$$

Tale sistema può essere ridefinito nella seguente forma matriciale:

$$\left(I - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & q_{AT,BT} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{GN,vap} & q_{GN,GG} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{ai,vap} & q_{ai,GG} & q_{ai,ademi} & q_{ai,f} & q_{ai,ac} & 0 & 0 & q_{ai,ireo} & 0 \\ 0 & 0 & q_{BT,ai} & 0 & q_{BT,vap} & q_{BT,GG} & q_{BT,ademi} & q_{BT,f} & q_{BT,ac} & q_{BT,as} & q_{BT,tar} & q_{BT,ireo} & q_{BT,idac} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{vap,ireo} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{ac,vap} & q_{ac,GG} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} i_{AT} \\ i_2 \\ i_3 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \\ u_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ d_{GN} \\ d_{ai} \\ d_{BT} \\ d_{vap} \\ d_{GG} \\ d_{ademi} \\ d_f \\ d_{ac} \\ d_{as} \\ d_{tar} \\ d_{ireo} \\ d_{idac} \end{bmatrix}$$

dove I è matrice identità caratterizzata da elementi nulli eccetto i termini unitari sulla diagonale principale. La matrice quadrata è detta matrice dei coefficienti tecnici, o matrice dei consumi specifici; il vettore delle incognite è costituito dalle quantità riferite agli input primari e quelli

intermedi di autoconsumo e il vettore dei termini noti è quello contenente i valori della domanda finale di ogni centro utente.

Si ottiene dunque:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & -q_{AT,BT} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -q_{GN,vap} & -q_{GN,GG} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & -q_{ai,vap} & -q_{ai,GG} & -q_{ai,ademi} & -q_{ai,f} & -q_{ai,ac} & 0 & 0 & -q_{ai,ireo} & 0 \\
 0 & 0 & -q_{BT,ai} & 1 & -q_{BT,vap} & -q_{BT,GG} & -q_{BT,ademi} & -q_{BT,f} & -q_{BT,ac} & -q_{BT,as} & -q_{BT,tar} & -q_{BT,ireo} & -q_{BT,idac} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -q_{vap,ireo} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -q_{ac,vap} & -q_{ac,GG} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 i_{AT} \\
 i_{GN} \\
 i_{ai} \\
 u_{BT} \\
 u_{vap} \\
 u_{GG} \\
 u_{ademi} \\
 u_f \\
 u_{ac} \\
 u_{as} \\
 u_{tar} \\
 u_{ireo} \\
 u_{idac}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 d_{GN} \\
 d_{ai} \\
 d_{BT} \\
 d_{vap} \\
 d_{GG} \\
 d_{ademi} \\
 d_f \\
 d_{ac} \\
 d_{as} \\
 d_{tar} \\
 d_{ireo} \\
 d_{idac}
 \end{bmatrix}$$

Il sistema può essere risolto invertendo la matrice quadrata:

$$\begin{bmatrix}
 i_{AT} \\
 i_{GN} \\
 i_{ai} \\
 u_{BT} \\
 u_{vap} \\
 u_{GG} \\
 u_{ademi} \\
 u_f \\
 u_{ac} \\
 u_{as} \\
 u_{tar} \\
 u_{ireo} \\
 u_{idac}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & -q_{AT,BT} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -q_{GN,vap} & -q_{GN,GG} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & -q_{ai,vap} & -q_{ai,GG} & -q_{ai,ademi} & -q_{ai,f} & -q_{ai,ac} & 0 & 0 & -q_{ai,ireo} & 0 \\
 0 & 0 & -q_{BT,ai} & 1 & -q_{BT,vap} & -q_{BT,GG} & -q_{BT,ademi} & -q_{BT,f} & -q_{BT,ac} & -q_{BT,as} & -q_{BT,tar} & -q_{BT,ireo} & -q_{BT,idac} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -q_{vap,ireo} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -q_{ac,vap} & -q_{ac,GG} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}^{-1}
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 d_{GN} \\
 d_{ai} \\
 d_{BT} \\
 d_{vap} \\
 d_{GG} \\
 d_{ademi} \\
 d_f \\
 d_{ac} \\
 d_{as} \\
 d_{tar} \\
 d_{ireo} \\
 d_{idac}
 \end{bmatrix}$$

Il procedimento riportato permette di prevedere i valori i relativi alle quantità di vettori importati e gli outputs u destinati all'autoconsumo in funzione della matrice dei consumi specifici e del vettore della domanda finale. La forza di tali calcoli risiede soprattutto nella possibilità di previsione: fissando il vettore della domanda finale, con valori ipotizzati o effettivi, è possibile, non solo stimare la quantità di inputs acquistati, i , ma anche prevedere i volumi produttivi, u , relativi a ciascun impianto al fine di soddisfare sia la domanda intermedia sia quella finale.

5.2.1 Definizione dei consumi specifici

L'aspetto più rilevante della costruzione della matrice è la determinazione dei coefficienti tecnici a_{kj} : in questa trattazione, essi rappresentano la quantità di vettori primari necessari alla produzione di un'unità di output energetico in riferimento a ciascun impianto.

E' evidente che ogni energy driver, per essere ottenuto, necessita di quantità ben definite di vettori primari: tali quantità sono riassunte nel valore del coefficiente tecnico corrispondente a ciascun energy driver. In particolare, i coefficienti tecnici vengono qui definiti *consumi specifici* q_{kj} del vettore del settore k per la produzione del vettore del settore j . Dunque, la matrice dei coefficienti tecnici è definita dai consumi specifici di ogni impianto dello stabilimento.

Il consumo specifico riferito ad un impianto è caratterizzato da due componenti: una fissa, che indica il consumo energetico in condizioni di produzione nulla, e una variabile, dipendente dai volumi produttivi. Il contributo fisso può essere dovuto a caratteristiche intrinseche dei processi o ad instabilità e malfunzionamenti del sistema; tale quantità è identificata dall'intercetta delle equazioni caratteristiche ottenute nel Capitolo 4. Il consumo specifico variabile, invece, determina la pendenza delle rette di interpolazione precedenti e rappresenta uno degli indicatori dell'efficienza del processo.

Il consumo specifico q è definito nel modo seguente:

$$q = \frac{E_{in}}{V} \quad (5.1)$$

- E_{in} è il consumo energetico, identificato dalle equazioni caratteristiche del capitolo precedente:
 $E_{in} = C_0 + kV$;
- V è la quantità di vettore energetico prodotto.

Dunque, riprendendo la forma dell'equazione di consumo:

$$q = \frac{c_0 + c_1 V}{V} \quad (5.2)$$

Dove:

- $\frac{c_0}{V}$ è il consumo specifico variabile;
- c_1 è il consumo specifico fisso.

Mentre c_1 è unico e costante per ciascun processo, il consumo specifico dovuto al consumo fisso è variabile in funzione della produzione: in particolare, tale quantità è inversamente proporzionale ai volumi produttivi. Di seguito è stato considerato, a titolo di esempio, il caso del consumo di energia elettrica per la produzione di aria compressa:

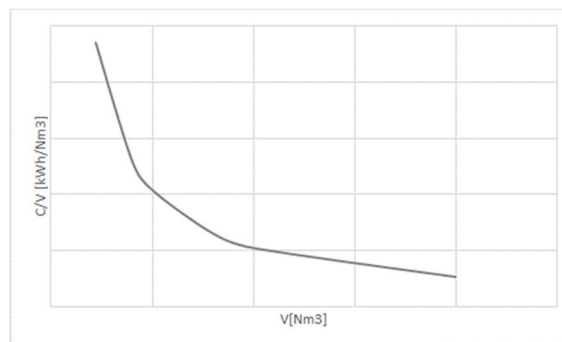


Figura 87 Esempio dell'andamento della quota di consumo fisso in funzione del volume produttivo

In figura 87 è immediato osservare l'andamento decrescente del consumo fisso specifico in funzione dei volumi prodotti.

Moltiplicando numeratore e denominatore per c_1 e definendo $k = \frac{c_1 V}{c_0 + c_1 V}$, si ottiene:

$$q = \frac{c_0 + c_1 V}{c_1 V} c_1 = \frac{c_1}{k} \quad (5.3)$$

Essendo il consumo specifico fisso non costante, esso deve essere aggiornato in funzione della produzione totale, comprensiva della quota di domanda finale del Cliente e dell'autoconsumo all'interno dello stabilimento. In altri termini, definito il periodo temporale di analisi, la produzione prevista è differente e deve essere considerata nei consumi specifici utilizzati nella matrice.

5.3 Verifica della validità del modello

È stata verificata la correttezza della matrice, applicandola ai fini del calcolo dei consumi energetici del 2016 e di alcuni mesi del 2017, confrontati in seguito con i valori effettivi.

È stato scelto il 2016, in quanto, al momento dell'analisi, si disponeva di tutte le misure reali; la verifica è stata svolta anche per i primi quattro mesi del 2017, utilizzati nel capitolo precedente come periodo di monitoraggio. Attraverso la matrice, sono stati calcolati i consumi energetici in riferimento al vettore della domanda finale. Il calcolo è stato svolto, quindi, sia su base mensile che su base annuale: si ricordi che i consumi specifici, in particolare la quota fissa, non sono costanti ma dipendono dal volume produttivo in modo inversamente proporzionale. A tal proposito, a seconda dell'unità temporale, la matrice viene aggiornata e se ne verifica l'esattezza.

Come precisato, il modello è stato utilizzato per una previsione su scala annuale e un'altra su base mensile; in particolare, l'analisi era riferita ai seguenti valori di domanda finale:

	d,eeAT [kWh]	d,gas naturale [Sm3]	d,ai [m3]	d, eeBT [kWh]	d,vapore [MJ]	d,GG	d,ademi [m3]
2016	-	7.296.129	2.333.108	227.980.426	553.872.597	2.054	98.767
gen-17	-	615.302	170.534	21.122.770	85.267.142	492	10.314
feb-17	-	582.221	179.732	19.790.945	67.825.418	418	6.330
mar-17	-	692.147	187.839	20.788.865	53.083.076	256	7.892
apr-17	-	549.833	183.430	16.230.951	38.761.753	97	6.250
	d,freddo [MJ]	d,ac [Nm3]	d,as [Nm3]	d,tar [m3]	d,ireo [m3]	d_idac [m3]	
2016	9.889.540	210.729.846	5.947.150	1.443.460	17.292	144.710	
gen-17	538.624	17.711.569	424.172	115.000	1.312	18.290	
feb-17	539.244	17.157.459	411.117	114.780	1.063	29.220	
mar-17	605.588	20.887.651	503.615	116.590	1.092	24.400	
apr-17	482.668	17.477.339	429.116	113.140	948	13.500	

Tabella 21 Valori della domanda finale dell'anno 2016 e dei primi 4 mesi del 2017

Ottenuti i consumi previsti, relativamente a vettori primari ed intermedi, essi sono stati confrontati ai valori effettivi attraverso il calcolo degli scostamenti.

	2016		
	risultati Input-Output	valori effettivi	Δ
energia elettrica AT [kWh]	265.256.368	278.262.764	5%
gas naturale [Sm3]	59.231.336	62.299.239	5%
acqua industriale [m3]	2.945.476	3.299.609	11%
energia elettrica BT [kWh]	261.277.522	274.088.823	5%
vapore tecnologico [MJ]	562.518.624	568.289.421	1%
gradi giorno	2.054	2.054	0%
acqua demineralizzata [m3]	98.767	98.767	0%
energia frigorifera [MJ]	9.889.540	9.889.540	0%
aria compressa [Nm3]	216.639.859	230.338.907	6%
aria surpressa [Nm3]	5.947.150	5.947.150	0%
reflui tar [m3]	1.443.460	1.443.460	0%
reflui ireo [m3]	17.292	17.292	0%
reflui idac [m3]	144.710	144.710	0%

Tabella 22 Confronto dei risultati annuali relativi al 2016

	gennaio 2017			febbraio 2017		
	risultati Input-Output	valori effettivi	Δ	risultati Input-Output	valori effettivi	Δ
energia elettrica AT [kWh]	26.584.235	26.757.043	1%	24.860.016	24.714.017	-1%
gas naturale [Sm3]	11.929.366	12.749.580	6%	9.629.091	9.221.773	-4%
acqua industriale [m3]	262.154	239.766	-9%	264.089	240.351	-10%
energia elettrica BT [kWh]	26.185.471	26.355.687	1%	24.487.116	24.343.307	-1%
vapore tecnologico [MJ]	86.232.999	86.726.849	1%	68.671.603	68.937.282	0%
gradi giorno	492	492	0%	418	418	0%
acqua demineralizzata [m3]	10.314	10.314	0%	6.330	6.330	0%
energia frigorifera [MJ]	538.624	538.624	0%	539.244	539.244	0%
aria compressa [Nm3]	19.263.775	19.756.736	2%	18.580.198	18.987.589	2%
aria surpressa [Nm3]	424.172	424.172	0%	411.117	411.117	0%
reflui tar [m3]	115.000	115.000	0%	114.780	114.780	0%
reflui ireo [m3]	1.312	1.312	0%	1.063	1.063	0%
reflui idac [m3]	18.290	18.290	0%	29.220	29.220	0%

	marzo 2017			aprile 2017		
	risultati Input-Output	valori effettivi	Δ	risultati Input-Output	valori effettivi	Δ
energia elettrica AT [kWh]	25.585.919	25.784.000	1%	19.963.540	19.987.000	0%
gas naturale [Sm3]	7.003.810	6.775.620	-3%	3.687.293	3.535.421	-4%
acqua industriale [m3]	276.835	254.880	-9%	261.340	246.900	-6%
energia elettrica BT [kWh]	25.202.130	25.397.240	1%	19.664.087	19.687.195	0%
vapore tecnologico [MJ]	53.943.199	54.160.863	0%	39.552.668	39.787.192	1%
gradi giorno	256	256	0%	97	97	0%
acqua demineralizzata [m3]	7.892	7.892	0%	6.250	6.250	0%
energia frigorifera [MJ]	605.588	605.588	0%	482.668	482.668	0%
aria compressa [Nm3]	22.143.940	22.634.194	2%	18.569.150	19.093.616	3%
aria surpressa [Nm3]	503.615	503.615	0%	429.116	429.116	0%
reflui tar [m3]	116.590	116.590	0%	113.140	113.140	0%
reflui ireo [m3]	1.092	1.092	0%	948	948	0%
reflui idac [m3]	24.400	24.400	0%	13.500	13.500	0%

Tabella 23 Confronto risultati mensili relativi al periodo di monitoraggio

5.3.1 Analisi dei risultati

Osservando i risultati ordinati nelle tabelle 21 e 22, è apprezzabile la precisione dell'analisi: i valori di consumo previsti tramite il modello Input-Output aderiscono a quelli reali con scostamenti piuttosto limitati. Eccetto il caso relativo all'introduzione di acqua industriale, approfondito in seguito, gli altri vettori energetici rispondono all'analisi in modo estremamente positivo.

Si nota, in particolare, che l'analisi mensile applicata ai periodi di monitoraggio, gennaio, febbraio, marzo, aprile del 2017, determina previsioni caratterizzate da scostamenti inferiori al 5% rispetto alle quantità effettive. Per quanto riguarda l'applicazione annuale, essa soffre di percentuali di errore leggermente più elevate, ma è necessario puntualizzare che tali valori siano comunque molto precisi se relativi ad una previsione annuale.

Focalizzandosi sui singoli vettori energetici, si osserva che i risultati relativi all'energia elettrica sono i più aderenti alla realtà. Sicuramente è da considerare l'alta percentuale, rispetto all'input totale, di energia elettrica destinata al cliente: poiché la domanda finale costituisce il termine noto dell'analisi, essa non determina eventuali scostamenti. Considerando, quindi, la suddivisione dell'energia elettrica destinata agli autoconsumi, la precisione della matrice Input-Output è determinata durante la caratterizzazione energetica e l'individuazione dei consumi specifici. In particolare, la caratterizzazione dei consumi è stata raggiunta studiando le relazioni tra vettori primari e volumi produttivi: il coefficiente di correlazione lineare R permette di ottenere una prima stima della linearità delle relazioni indagate: a tal proposito, i consumi elettrici relativi ai diversi volumi produttivi erano caratterizzati da coefficienti di Pearson piuttosto elevati, in modo particolare quelli riferiti alla produzione di aria compressa e di energia frigorifera e alla distribuzione del calore. Le attività citate, tra l'altro, sono responsabili quasi della totalità degli autoconsumi elettrici dello stabilimento, come rappresentato nel diagramma a torta in figura 86. Risulta che maggiore è la linearità della relazione che lega consumi e prodotti, più precisa è l'equazione di regressione lineare che la descrive e, dunque, il consumo specifico che ne deriva.

Per questo, nonostante l'utilizzo di energia elettrica coinvolga tutto lo stabilimento rendendo maggiormente complessa la rete di consumo-produzione, tali consumi sono descrivibili da relazioni talmente precise che la matrice Input-Output risulta estremamente adatta per descriverli.

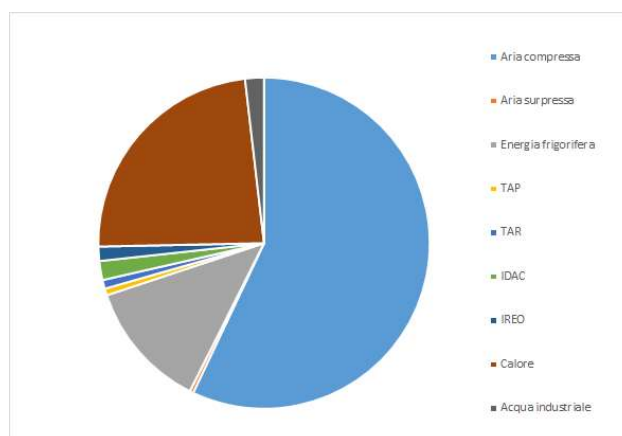


Figura 88 Suddivisione autoconsumi di energia elettrica nello stabilimento

Relativamente al consumo di gas naturale, gli scostamenti tra valori effettivi e previsti sono leggermente maggiori rispetto al caso precedente: probabilmente tale aspetto è dovuto a caratteristiche di consumo meno precise.

Per quanto riguarda il consumo previsto di acqua industriale, esso si discosta da quello effettivo di valori più alti rispetto agli scostamenti degli vettori energetici analizzati. La bassa precisione nella previsione della quantità mensile di acqua industriale utilizzata, è stata indagata per capirne le motivazioni.

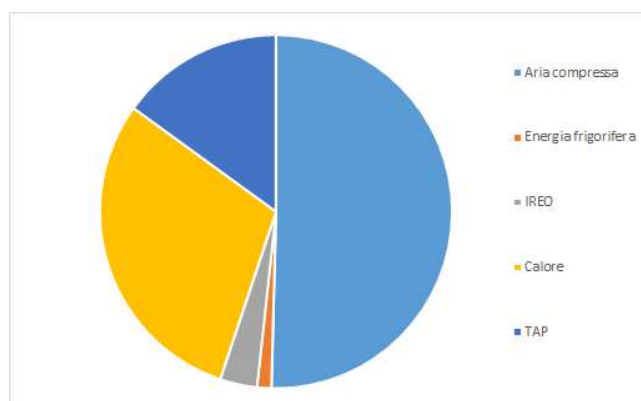


Figura 89 Suddivisione autoconsumi di acqua industriale nello stabilimento

La percentuale maggiore di consumo, più del 70% dell'acqua totale introdotta, è dovuta alla domanda del Cliente: tale quantità non è stata riportata sul grafico poiché non ha impatto sugli scostamenti delle previsioni. Il diagramma in figura 87 ha, invece, lo scopo di fornire un'immagine immediata della suddivisione degli autoconsumi di acqua industriale: con quote di consumo del 10-15% rispetto al fabbisogno globale, gli impianti probabilmente responsabili dell'errore di previsione sono le centrali termiche e gli impianti di produzione di aria compressa. Gli elevati scostamenti sono dovuti alle deboli relazioni tra consumi e prodotti trovate, già evidenti nei diagrammi di dispersione.

A prova della fragile relazione che lega il consumo di acqua ai volumi produttivi sono i seguenti avvenimenti:

- Per quanto riguarda le centrali termiche, nell'ultimo anno sono state migliorate le tecniche di ricircolo della condensa del vapore che, però, non dispone ancora di un misuratore di portata proprio. Perché si possa raggiungere una previsione più aderente alla realtà, è necessario che tutte le portate vengano misurate con precisione in modo da creare un modello che rispecchi fedelmente gli avvenimenti.
- In riferimento agli impianti di produzione di aria compressa, si ricorda che l'acqua industriale è utilizzata per il raffreddamento degli impianti, cioè non è direttamente impiegata nella produzione del vettore: per questo diventa difficile che si instauri una relazione del tutto lineare rispetto all'aria prodotta. Inoltre l'alimentazione di acqua industriale è variabile, in quanto viene alternata all'utilizzo di torri evaporative.

La verifica effettuata riguardo la validità della matrice Input-Output per la determinazione dei consumi primari ed intermedi ha fornito risultati positivi, caratterizzati da scostamenti, rispetto ai valori reali, accettabili. L'unica criticità del caso studiato è apparsa in riferimento ai calcoli relativi al vettore acqua industriale: tale limite, però, non è assoggettabile al metodo bensì alle misure a disposizione. Sicuramente, in presenza di misuratori tarati delle portate d'acqua e di condense riciclate negli impianti, i metodi statistici avrebbero fornito equazioni caratteristiche più precise e l'analisi input-Output, a sua volta, risultati più aderenti alla realtà.

Verificata la validità del modello per l'analisi energetica di un generico stabilimento industriale, sono stati approfonditi alcuni ambiti di applicazione. Nei prossimi capitoli, infatti è possibile apprezzarne l'utilità come strumento di analisi di fattibilità di interventi di ottimizzazione energetica, capitolo 6, e come mezzo di gestione economica dello stabilimento, capitolo 7.

6 Valutazione di interventi di ottimizzazione

La raccolta dello storico dei dati relativi all'utilizzo energetico dello stabilimento e la conseguente caratterizzazione, approfondite nei capitoli precedenti, hanno il fine di descrivere, monitorare e gestire tutti i flussi degli impianti in analisi: in particolare, è conveniente porre l'attenzione sulla possibilità di valutazione di eventuali interventi di ottimizzazione e sulla previsione dei consumi dei diversi vettori energetici. Uno dei compiti principali del sistema di gestione di stabilimenti particolarmente energivori è l'identificazione e l'introduzione di cambiamenti operativi per la riduzione di consumi e costi energetici.

Lo sfruttamento del modello Input-Output diventa estremamente vantaggioso nel caso di stabilimenti complessi come quello in analisi: tale metodo permette di relazionare il miglioramento energetico di un determinato intervento al contesto generale, consentendo la stima dell'effettivo risparmio.

Questo capitolo è volto all'analisi di alcune sostituzioni ed interventi di miglioramento attraverso l'utilizzo della tavola Input-Output costruita nel capitolo precedente: la presenza di impianti di diversa entità e influenza sulla globalità del sistema rende lo sfruttamento del modello di Leontief ulteriormente conveniente.

6.1 Analisi di significatività dei consumi

L'individuazione di eventuali interventi di ottimizzazione energetica è da post-porre all'analisi di significatività dello stabilimento: gli impianti ritenuti maggiormente energivori costituiscono l'oggetto principale delle opportunità di miglioramento in ordine di priorità.

L'analisi dell'uso significativo di energia consta nel confronto di impianti di diverse tipologie e dimensioni e, soprattutto, caratterizzati da consumo e produzione di vettori energetici differenti. I consumi di ciascun impianto, identificati nel terzo capitolo, sono stati riassunti nella tabella seguente.

	energia elettrica BT [kWh]	gas naturale [Sm3]	acqua industriale [m3]
Impianti di produzione e distribuzione del calore	10.832.924	55.003.110	174.864
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	299.222	-	988
Distribuzione acqua industriale	845.113	-	-
Impianti di produzione aria compressa	26.297.911	-	640.720
Impianti di produzione aria surpressa	163.761	-	-
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	4.173.941	-	-
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	856.860	-	-
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	397.597	-	-
Impianto di rottura emulsioni oleose (IREO)	641.227	14.416.825	42.743
Impianti di produzione di energia frigorifera	5.773.782	-	31.126

Tabella 24 Consumo vettori primari per ciascuna macroattività

Si evidenzia che tutti gli impianti consumano energia elettrica in bassa tensione quindi, nonostante il vettore primario entrante nel sistema di generazione sia elettricità in alta tensione, ai fini dell'analisi dei consumi, è stata considerata energia elettrica trasformata.

Per consentire un confronto rilevante e paritario, le energie primarie sono state convertite in tep a partire dalle unità di misura originarie. Il tep è definito come la quantità di energia termica prodotta dalla combustione di una tonnellata di petrolio. È evidente che ciascun vettore energetico sia caratterizzato da un fattore di conversione specifico. I coefficienti di conversione utilizzati sono riassunti di seguito e rispettano le direttive della Circolare del Ministero dello Sviluppo Economico del 18 dicembre 2014.

- 1kWh=0,000187 tep
- 1Sm3=0,000777278 tep
- 1m3=0,00082

Di seguito sono riportate due rappresentazioni, una tabellare ed una grafica, conclusive della significatività delle macroattività considerate, riferite ai consumi espressi in tep.

	energia elettrica BT [tep]	gas naturale [tep]	acqua industriale [tep]	TOT
Impianti di produzione e distribuzione del calore	2.026	42.753	143	44.922
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	56	-	1	57
Distribuzione acqua industriale	158	-	-	158
Impianti di produzione aria compressa	4.918	-	525	5.443
Impianti di produzione aria surpressa	31	-	-	31
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	781	-	-	781
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	160	-	-	160
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	74	-	-	74
Impianto di rottura emulsioni oleose (IREO)	120	11.206	35	11.361
Impianti di produzione di energia frigorifera	1.080	-	26	1.105

Tabella 25 Consumo vettori primari in tep per ciascuna macroattività

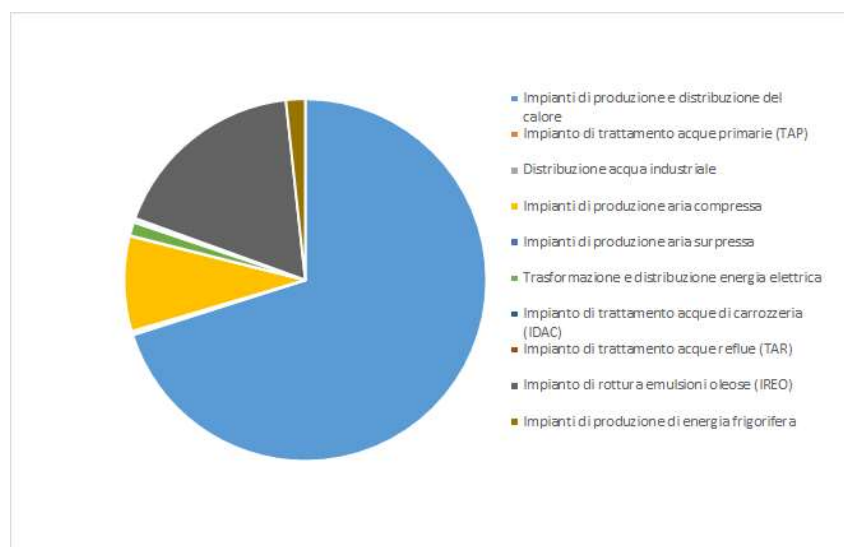


Figura 90 Suddivisione del consumo di vettori primari in riferimento alle diverse macroattività

Il grafico a torta consente una veloce identificazione dell'impatto energetico degli impianti in riferimento ai consumi totali; in particolare emergono come significativi:

- Impianti di produzione di calore;
- Impianti di produzione di aria compressa;
- Impianto di rottura delle emulsioni oleose;
- Impianti di produzione di energia frigorifera.

Tale analisi di significatività ha l'obiettivo di identificare in modo veloce gli impianti maggiormente energivori rispetto ai quali concentrare la ricerca di eventuali interventi migliorativi. È necessario, comunque, puntualizzare che analisi più precise considerino ulteriori fattori; in particolare, estremamente importante è il tipo di valore relativo al consumo: esso ha un impatto profondamente differente nel caso in cui sia effettivamente misurato da misuratori appositi o, al contrario, se sia calcolato o stimato. In altri termini, se la misura di un generico consumo è poco precisa, questo fattore contribuisce a rendere il consumo stesso maggiormente significativo, sottolineando la necessità di un intervento di efficientamento. Considerando gli impianti in analisi, si ricorda che, per quanto riguarda i trasformatori di energia elettrica, i valori di consumo sono stati stimati in quanto i misuratori sono posizionati solamente a monte di essi.

Si evince, comunque, che gli impianti caratterizzati da uso significativo di energia siano quelli citati. Dunque l'identificazione di eventuali opportunità di miglioramento ha coinvolto prevalentemente le attività suddette; in particolare, sono risultati interessanti le seguenti proposte:

- Sostituzione di un compressore nel reparto Carrozzeria;
- Sostituzione di un compressore nel reparto Presse;

- Sostituzione di uno scambiatore di calore per la produzione di acqua surriscaldata;
- Pulizia dei gruppi frigoriferi.

6.2 Interventi negli impianti di produzione di aria compressa

L'intervento di ottimizzazione energetica relativo all'impianto di produzione di aria compressa prevede la sostituzione di due compressori nelle sale apposite dei reparti Carrozzeria e Presse.

6.2.1 Sostituzione di un compressore nel reparto Carrozzeria

La sostituzione in analisi è relativa alla sala compressori della Carrozzeria. Il compressore oggetto di sostituzione è un Ingersoll Rand, mentre quello previsto è della casa produttrice Atlas Copco.

Lo studio di fattibilità ha lo scopo di quantificare l'eventuale risparmio energetico globale in seguito alla sostituzione del compressore presente da 2100 kW con uno da 1400 kW, considerando una riduzione della portata nominale trattata da 20.000 m³/h a 13.000 m³/h. Si è ipotizzato che il tempo di funzionamento sia di circa 12 ore al giorno, cioè di 4380 ore annue. La potenza annuale assorbita dai compressori è stata calcolata come prodotto dei watt assorbiti e delle ore di funzionamento annuali, quindi:

$$P[kWh] = P_{ass}[kW] * ore[h/anno] \quad (6.1)$$

Il consumo specifico relativo all'attività di produzione di aria compressa è definito dalla quantità di energia assorbita per unità di aria prodotta, cioè kW/m³.

I valori relativi ai due compressori sono riassunti nella tabella seguente:

SITUAZIONE PRIMA DELL'INTERVENTO	
IDENTIFICATIVO IMPIANTO	Ingersoll Rand Centac C225MX3-2RH
ORE DI FUNZIONAMENTO [h/anno]	4380
POTENZA ASSORBITA[kW]	2100
POTENZA ANNUALE [kWh/anno]	9.198.000
PORTATA [m ³ /h]	18000
CONSUMO SPECIFICO [kWh/m ³]	0,117
SITUAZIONE DOPO L' INTERVENTO	
IDENTIFICATIVO IMPIANTO	ZH 15000 ATLAS COPCO
ORE DI FUNZIONAMENTO [h/anno]	4380
POTENZA ASSORBITA[kW]	1400
POTENZA ANNUALE [kWh/anno]	6.132.000
PORTATA [m ³ /h]	13000
CONSUMO SPECIFICO [kWh/m ³]	0,108

Tabella 26 Confronto caratteristiche dei compressori ante e post intervento

Inoltre, dal confronto della potenza annuale assorbita dal compressore e quella totale imputata al parco compressori, è risultato un impatto del 35% sui consumi di energia elettrica.

A partire dai dati di risparmio dovuto alla sostituzione e dalla percentuale di significatività del compressore in analisi, è emerso che l'intervento porta ad una riduzione del consumo specifico di energia elettrica del 3,5%.

6.2.2 Sostituzione di un compressore nel reparto Presse

Per quanto riguarda la sala compressori del reparto Presse, l'intervento prevede la sostituzione di un compressore Ingersoll Rand con un Atlas Copco, entrambi da 1400 kW, ma caratterizzati da diverse portate nominali trattate: rispettivamente 11.000 m³/h e 13.000 m³/h.

Anche in questo caso le ore di funzionamento ipotizzate sono 4380 all'anno. La potenza annuale ed il consumo specifico caratteristici dei due compressori sono stati calcolati come spiegato precedentemente e ordinati nella tabella seguente.

SITUAZIONE PRIMA DELL'INTERVENTO	
IDENTIFICATIVO IMPIANTO	Ingersoll Rand Centac C225MX3-2RH
ORE DI FUNZIONAMENTO [h/anno]	4380
POTENZA ASSORBITA[kW]	1400
POTENZA ANNUALE [kWh/anno]	6.132.000
PORTATA [m ³ /h]	11000
CONSUMO SPECIFICO [kWh/m ³]	0,127
SITUAZIONE DOPO L' INTERVENTO	
IDENTIFICATIVO IMPIANTO	ZH 15000 ATLAS COPCO
ORE DI FUNZIONAMENTO [h/anno]	4380
POTENZA ASSORBITA[kW]	1400
POTENZA ANNUALE [kWh/anno]	6.132.000
PORTATA [m ³ /h]	13000
CONSUMO SPECIFICO [kWh/m ³]	0,108

Tabella 27 Confronto caratteristiche dei compressori ante e post intervento

La riduzione del consumo specifico globale del parco compressori dovuta alla sostituzione valutata è circa del 5,1%: tale valore è stato ottenuto a partire dalla diminuzione del consumo specifico consentito dall'intervento e dal calcolo della percentuale di impatto del compressore sostituito pari al 23%.

I consumi caratteristici dei due compressori Atlas Copco sono evidentemente più convenienti rispetto alle macchine attuali: l'aspetto interessante della valutazione è la generalizzazione del risparmio energetico in riferimento allo stabilimento globale. È ormai chiara la complessità dello stabilimento in analisi e il conseguente vantaggio relativo allo sfruttamento della matrice Input-Output.

A partire dalle percentuali di risparmio energetico calcolate, è possibile quantificare il nuovo consumo specifico di energia elettrica riferito alla macroattività responsabile della produzione di aria compressa. La convenienza relativa all'intervento in analisi è stata valutata in riferimento ai dati di consumo annuali del 2016: sono stati confrontati i fabbisogni energetici precedenti e successivi

alla sostituzione. In particolare, il nuovo consumo specifico, 0,081 kWh/Nm³, è stato inserito nella matrice in corrispondenza della riga degli inputs relativa all'energia elettrica in bassa tensione e della colonna dell'output aria compressa.

6.3 Sostituzione di uno scambiatore di calore

Tra le opportunità di miglioramento proposte ai fini dell'ottimizzazione dei consumi energetici, è emerso il vantaggio dell'eventuale sostituzione di uno scambiatore di calore. Lo scambiatore scelto per l'intervento è adibito alla produzione di acqua surriscaldata nella centrale termica di media pressione: a causa della vetustà dell'impianto (anno di costruzione 1994), negli anni si sono resi necessari interventi di occlusione del fascio tubiero al fine di riparare alcune perdite. L'invecchiamento dello scambiatore, inoltre, ha causato sporcamento dei tubi tale da peggiorare l'efficienza di scambio termico. Nei calcoli di seguito si tengono in considerazione gli aspetti suddetti per apprezzare il vantaggio effettivo dell'intervento in analisi.

I dati relativi allo scambiatore in sostituzione sono riassunti nella tabella seguente.

Descrizione macchina (marca)	Poggi Legnani
Q _{nom} [kW]	30.238
A [m ²]	300

Tabella 28 Caratteristiche scambiatore di calore in sostituzione

Dove Q_{nom} descrive la potenza termica nominale scambiata in kW e A l'area di scambio termico in m². Lo scambiatore considerato è del tipo a superficie, cioè i due fluidi sono separati da una superficie impermeabile e non si mescolano: la trasmissione del calore avviene per convezione tra i due fluidi e le superfici lambite e per conduzione attraverso le pareti del tubo di separazione.

I fluidi, scambiati in equicorrente nella macchina, sono acqua e vapore e sono state rilevate le seguenti temperature di scambio termico.

acqua		vapore	
T _{in} [°C]	120	T _{in} [°C]	150
T _{out} [°C]	140	T _{out} [°C]	150

Tabella 29 Temperature di ingresso e uscita fluido termovettore

Il coefficiente di scambio termico U è stato calcolato seguendo il metodo MLDT (Media Logaritmica delle Differenze di Temperatura) supponendo che la conduttanza termica unitaria sia costante lungo tutta la parete. In particolare:

$$Q = U * A * \Delta T_{ML} \quad (6.2)$$

Dove ΔT_{ML} è la differenza media logaritmica delle temperature tra fluido freddo e caldo, che permette di considerare il valore medio delle temperature all'interno dello scambiatore.

$$\Delta T_{ML} = \left| \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \right| \quad (6.3)$$

Dove $T_2 = T_{vap,out} - T_{H_2O,out}$ e $T_1 = T_{vap,in} - T_{H_2O,in}$.

Il coefficiente globale di scambio termico è stato calcolato attraverso l'equazione 6.2:

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{ML}} \quad (6.4)$$

Per il calcolo dell'efficienza è stato utilizzato il metodo NTU secondo cui si può dimostrare che essa sia esprimibile in funzione di due parametri adimensionali: $\varepsilon = f(NTU, C)$. In particolare, NTU è il numero di unità di trasmissione del calore pari a

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (6.5)$$

Dove C_{min} è la capacità termica minima dei fluidi riferita alla differenza massima di temperatura tra acqua e vapore.

$$C_{min} = \frac{Q_{nom}}{\Delta T_{max}} \quad (6.6)$$

L'efficienza massima di scambio termico risulta quindi:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (6.7)$$

I valori nominali calcolati relativi allo scambiatore in analisi sono riassunti nella tabella seguente:

ΔT_{ml} [°C]	18,20
U [kW/m ² °C]	5,54
Cmin [kW/°C]	1.008
NTU [-]	1,65
ε [%]	80,8%

Tabella 30 Risultati caratterizzazione scambiatore di calore

Per la valutazione del risparmio effettivo ottenibile dalla sostituzione dello scambiatore è necessario considerarne gli effetti causati dall'invecchiamento.

Il primo aspetto fondamentale è lo sporcamento dei tubi che ne riduce l'efficienza di scambio. In primo luogo è possibile calcolare la resistenza termica R_t legata al coefficiente di scambio termico, comprensiva sia del termine conduttivo sia di quello convettivo:

$$R_t = \frac{1}{U \cdot A} \quad (6.8)$$

Considerando che l'effetto dello sporcamento coinvolga le superfici interna ed esterna del tubo ed introducendo l'analogia con la legge di Ohm, si assume che la resistenza termica totale sia costituita dai due termini aggiuntivi:

$$R_{int} = R_{est} = \frac{\delta}{k} = 0,0002 \frac{m^2 \circ C}{kW} \quad (6.9)$$

Risulta che la resistenza termica totale, derivante dalla disposizione in serie dei contributi relativi alla parete e allo sporcamento di entrambi i lati della stessa, è:

$$R_{TOT} = R_{parete} + \frac{R_{int} + R_{est}}{A} \quad (6.10)$$

Tale risultato permette di valutare il coefficiente di scambio termico globale corrispondente a R_{TOT} tramite l'inversione dell'equazione 6.8 e, successivamente, il calcolo della riduzione di efficienza derivante dallo sporcamento dei tubi, pari a 0,09%.

Un aspetto aggiuntivo causato dall'invecchiamento dello scambiatore è determinato dai guasti che, negli anni, hanno reso necessari interventi di occlusione del fascio tubiero al fine di riparare le perdite. Ipotizzando che la percentuale di tubi intercettati, corrispondente alla percentuale di riduzione della superficie di scambio, non sia superiore al 10%. In seguito a tale stima, che equivale a considerare una riduzione della superficie di scambio termica del 10%, è stata rilevata una riduzione di efficienza del 4%. In aggiunta sono state ipotizzate le ore di funzionamento annuali, che ricoprono la stagione di riscaldamento, pari a 4344 ore/anno.

Dalle considerazioni precedenti deriva che un'eventuale sostituzione dello scambiatore, con uno nuovo caratterizzato dalle stesse peculiarità, porterebbe ad un risparmio di gas naturale pari a $1.185.422 \text{ Sm}^3$, valore calcolato in riferimento ai dati del 2016. Tale miglioramento determina una diminuzione del consumo specifico pari a $577 \text{ Sm}^3/GG$. In altri termini, il consumo specifico da sostituire nella matrice Input-Output, in corrispondenza dell'input gas naturale per la produzione di acqua surriscaldata rappresentata dall'output gradi giorno, è $16.958 \text{ Sm}^3/GG$.

6.4 Pulizia dei gruppi frigoriferi

L'ulteriore intervento risultato interessante riguarda la pulizia dei condensatori e degli evaporatori dei gruppi frigoriferi. Al momento dell'individuazione dell'intervento le macchine erano caratterizzate da un coefficiente di prestazione estremamente basso, circa 0,66, dovuto anche al funzionamento a carichi bassi. In seguito alla pulizia si prevede che il COP si riporti al suo valore medio di circa 4,76. Per stimare il saving si è considerata una produzione di acqua refrigerata pari a quella del 2016, cioè $9.889.540 \text{ MJ}$.

I dati di targa dei gruppi frigoriferi sono riportati nella tabella seguente:

Marca	TRANE CVGF 1000
portata acqua refrigerata [m3/h]	320,83
temperatura di ingresso[°C]	17
temperatura di uscita [°C]	7
Potenza frigorifera [kW]	3.731

Tabella 31 Caratteristiche dei gruppi frigoriferi

La potenza di ciascun compressore è pari a 584 kWe. Ne risulta che il coefficiente di prestazione, rappresentato dal rapporto tra potenza frigorifera e potenza assorbita, sia:

$$COP_{ottimale} = \frac{P_{frigo}}{P_{ass}} = 6,35 \quad (6.11)$$

A tal proposito, si è stimato che il COP medio dei gruppi in analisi ha valori pari a circa il 75% del COP ottimale, 4,76, che, confrontato con il risultato antecedente all'intervento, evidenzia un funzionamento estremamente lontano dalle condizioni ottime. Si prevede che l'intervento di pulizia possa permettere al COP di ristabilizzarsi al suo valore medio recuperando un ΔCOP pari a 4,11.

Dalla definizione di COP nell'equazione 6.11, è immediato il calcolo del risparmio energetico derivante dall'intervento.

$$Risparmio = \frac{P_{frigo}}{3,6 * \Delta COP} \quad (6.12)$$

Tale risparmio determina una diminuzione del consumo specifico di energia elettrica pari a 0,07: come spiegato precedentemente il nuovo valore di consumo, $0,27946 \frac{kW}{MJ}$, viene sostituito all'interno della matrice Input-Output, questa volta in corrispondenza dell'input energia elettrica in bassa tensione e dell'output energia frigorifera, per poter apprezzare la diminuzione del consumo energetico per il soddisfacimento della domanda finale.

6.5 Modello Input-Output per il calcolo del risparmio energetico

Una volta ottenuti i nuovi valori relativi ai consumi specifici in riferimento alle condizioni seguenti agli interventi di ottimizzazione in analisi, è stata utilizzata la matrice Input-Output per il calcolo dell'eventuale risparmio globale. Per la stima del saving energetico è stata considerata la domanda finale relativa all'anno 2016, riportata di seguito.

gas naturale [Sm3]	7.296.129
aria compressa [Nm3]	210.729.846
energia elettrica BT [kWh]	227.980.426
acqua industriale [m3]	2.333.108
vapore [MJ]	553.872.597
acqua demi [m3]	98.767
energia frigorifera [MJ]	9.889.540
aria surpressa [Nm3]	5.947.150
gradi giorno	2.054
reflui TAR [m3]	1.443.460
reflui IREO [m3]	17.292
reflui IDAC [m3]	144.710

Tabella 32 Domanda finale vettori energetici

I coefficienti tecnici non coinvolti negli interventi di miglioramento sono rimasti inalterati, mentre sono stati aggiornati i consumi specifici in corrispondenza delle righe di input e delle colonne di output identificate precedentemente. La matrice aggiornata, in cui sono stati posti in evidenza i consumi specifici in analisi, è riportata di seguito.

	i_eeAT	i_GN	i_ai	u_eeBT	u_vap	u_GG	u_ademi	u_f	u_ac	u_as	u_tar	u_ireo	u_idac
i_eeAT	0	0	0	1,015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i_GN	0	0	0	0	0,028	16958	0	0	0	0	0	0	0
i_ai	0	0	0	0	9,082E-05	13,961	1,010	0,003	0,002	0	0	1,730	0
u_eeBT	0	0	0,165	0	0,004	3589	1,220	0,279	0,081	0,027	0,164	4,487	0,806
u_vap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500,002	0
u_GG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_ademi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_ac	0	0	0	0	0,008	564,665	0	0	0	0	0	0	0
u_as	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_tar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_ireo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_idac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 33 Matrice dei consumi specifici per la valutazione del miglioramento dei consumi del 2016

Invertendo la matrice, come spiegato in precedenza, è stato possibile ricavare il vettore contenente gli inputs primari e gli outputs intermedi necessari al soddisfacimento della domanda finale. Come è risultato nel capitolo 5, l'utilizzo del metodo Input-Output fornisce risultati caratterizzati da lievi incertezze: i consumi conseguenti agli interventi analizzati sono stati confrontati dunque con i valori relativi all'anno 2016 previsti dal modello, al fine di evitare sovrastime dei risparmi e di ottenere dati di risparmio più realistici. È immediato osservare il risparmio energetico conseguente agli interventi riportato nella tabella seguente.

	2016 senza interventi	2016 con interventi	RISPARMI
Energia elettrica AT [kWh]	265.256.368	262.983.362	2.273.006
Gas naturale [Sm3]	59.231.336	57.878.383	1.352.953
Acqua industriale [m3]	2.945.476	3.004.990	- 59.514
Energia elettrica BT [kWh]	261.277.522	259.096.908	2.180.614
Vapore [MJ]	562.518.624	562.518.632	-
Gradi giorno	2.054	2.054	-
Acqua demi [m3]	98.767	98.767	-
Energia frigorifera [MJ]	9.889.540	9.889.540	-
Aria compressa [Nm3]	216.639.859	216.389.817	250.042
Aria surpressa [Nm3]	5.947.150	5.947.150	-
Reflui tar [m3]	1.443.460	1.443.460	-
Reflui ireo [m3]	17.292	17.292	-
Reflui idac [m3]	144.710	144.710	-

Tabella 34 Confronto consumi energetici relativi al 2016 ante e post interventi di ottimizzazione

Per quanto riguarda il consumo di energia elettrica in bassa tensione, e di conseguenza di energia elettrica in alta tensione, il risparmio è notevole. Anche il consumo di gas naturale subisce una significativa riduzione in seguito alla sostituzione dello scambiatore di calore. In riferimento a tale intervento la matrice Input-Output evidenzia un altro importante aspetto: per la produzione di calore viene utilizzata, come vettore in input, anche aria compressa e, grazie alla complessa costruzione della matrice, al momento del calcolo dei risparmi, il modello è in grado di segnalare anche la riduzione di tale vettore secondario. Tra i risultati del metodo appare un ulteriore cambiamento: la crescita del consumo di acqua industriale. In realtà tale aumento è dell'ordine del 2% e quindi estremamente ridotto: sono da ricordare, inoltre, le imprecisioni del modello in riferimento alla stima del consumo di acqua industriale emerse nel quinto capitolo. Alla luce di tali aspetti, non si considera rilevante l'aumento segnalato.

Osservando i risultati ottenuti in seguito alla valutazione degli interventi di ottimizzazione descritti, è possibile raggiungere due conclusioni. La prima, relativa ai miglioramenti in analisi, riguarda il significativo vantaggio ottenibile dalle sostituzioni e dalla pulizia dei gruppi frigoriferi in riferimento ai consumi energetici. La seconda riflessione è in merito al modello Input-Output che, ancora una volta, fornisce risultati estremamente precisi e utili, garantendo stime di carattere globale e puntuale relativamente allo studio di fattibilità svolto.

È evidente che, in caso di altri interventi, sia necessario modificare la matrice in riferimento ad essi, al fine di disporre, in ogni momento, della versione più aggiornata e precisa.

7 Gestione economica dello stabilimento

Il presente capitolo approfondisce un ulteriore vantaggioso utilizzo del modello Input Output: la possibilità di gestione dello stabilimento in analisi dal punto di vista economico. Precedentemente è stato affrontato il tema della gestione energetica degli impianti: il sistema di gestione dell'energia ha l'obiettivo di amministrare in modo razionale i fabbisogni dello stabilimento, attuando anche eventuali azioni di efficientamento e risparmio energetico. L'impiego efficiente ed efficace delle risorse deve essere analizzato anche dal punto di vista economico al fine di verificare il raggiungimento degli obiettivi, attraverso la determinazione degli scostamenti tra i risultati attesi e quelli previsti, e di controllare l'efficienza in riferimento al consumo delle risorse stesse.

Nel seguente capitolo viene studiato il processo di creazione del budget per l'anno 2017 attraverso l'utilizzo della matrice Input-Output; in seguito, in riferimento al consuntivo del medesimo anno, viene effettuata l'analisi degli scostamenti relativamente al campo energetico ed economico.

7.1 Budget standard

In primo luogo è stato predisposto il budget standard, prima in riferimento ai consumi energetici, poi relativamente ai costi dal punto di vista economico. Il budget standard è definito in sede previsionale: è costituito da valori stimati o determinati sulla base di assunzioni verificabili a posteriori.

Il budget riferito allo stabilimento in analisi è caratterizzato da costi variabili, relativi alla produzione, e costi fissi: il processo di budget è esteso ad ogni vettore energetico, al fine di raggiungere una visione chiara e costruttiva della suddivisione delle voci di costo.

All'interno del budget è considerata una componente ulteriore: quella riferita alle varianti pianificate di utilizzo, dette ΔU_p . I ΔU_p sono prevalentemente di natura efficientziale e servono a considerare le variazioni di consumo dovute a cambiamenti impiantistici o tecnologici previsti per l'anno in analisi. Nella seguente trattazione i ΔU_p introdotti sono riferiti agli interventi analizzati nel capitolo precedente.

Di seguito si procede con la definizione dei costi fissi e di quelli variabili in riferimento ad ogni macroattività.

7.1.1 Costi fissi

I costi fissi sono comprensivi di:

- Additivi e smaltimenti;
- Costi di gestione e manutenzione;
- Materiali;
- Ammortamenti;
- Personale;
- Spese generali (assicurazioni, spese mediche, sorveglianza, locazioni, sicurezza).

Per quanto riguarda tali voci di costo sono stati stimati i valori di budget relativamente ai dati storici. Sono stati ipotizzati costi mensili riferiti ad ogni macroattività presente nello stabilimento. Relativamente alla voce di costo relativa agli uffici e allo stabilimento in generale, essa è stata attribuita, anche nei casi seguenti, alle macroattività studiate nel modello in proporzione al costo del personale diretto riferito ad ogni impianto. Ai fini dell'elaborato è stato ritenuto sufficientemente precisa tale modalità, nonostante esistano metodi più accurati per questo tipo di suddivisione. In particolare, si riporta di seguito l'organizzazione del personale in riferimento ad ogni macroattività:

	n° dipendenti
Impianti di produzione e distribuzione del calore	20
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	6
Distribuzione acqua industriale	-
Impianti di produzione aria compressa	12
Impianti di produzione aria surpressa	4
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	12
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	6
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	6
Impianto rottura emulsioni oleose (IREO)	6
Polo freddo	12

Tabella 35 Numero di dipendenti per ogni macroattività

In aggiunta agli 84 dipendenti considerati, sono presenti altre 10 persone negli uffici con ruoli prettamente amministrativi. Il costo di questi ultimi è stato suddiviso tra le macroattività presenti in proporzione al numero di componenti di ognuna. Lo stesso procedimento è stato attuato per tutte le voci di costo fisso generali.

I costi del personale coinvolgono i 94 dipendenti di cui:

- 5 responsabili;
- 89 operatori di impianto e impiegati tecnici.

Per quanto riguarda i responsabili è stato ipotizzato un costo di € 75.000 per ciascuno, mentre € 50.000 annui per gli altri lavoratori. Anche in questo caso, i costi relativi a responsabili e amministrativi sono stati spalmati negli altri centri di costo.

Gli ammortamenti sono i costi relativi all'acquisto di impianti, macchinari o, in generale, beni destinati ad un utilizzo pluriennale, che vengono ripartiti in funzione del numero di anni di vita ipotizzati. In altri termini, l'ammortamento è il piano di restituzione graduale di un debito, mediante il pagamento periodico di rate. La quota di ammortamento, che definisce la percentuale dell'investimento totale da pagare annualmente, è calcolabile in funzione del numero di anni corrispondenti alla vita utile ipotizzata:

$$quota = \frac{1}{n^{\circ} \text{ anni}} [\%]$$

ai fini di questa analisi, sono stati adottati i coefficienti di ammortamento consigliati nel Decreto Ministeriale in vigore che, per l'attribuzione, tiene conto di due fattori:

- Settore di attività in cui opera l'impresa;
- La categoria a cui appartiene il bene.

Le quote, relative al settore industriale di produzione di vettori energetici, sono state ordinate nella tabella seguente in funzione del tipo di impianto:

	vita utile [anni]	
Impianti di produzione e distribuzione del calore	11	9%
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	7	15%
Impianti di produzione aria compressa	11	15%
Impianti di produzione aria surpressa	11	15%
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	13	8%
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	7	15%
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	7	15%
Impianto di rottura emulsioni oleose (IREO)	7	15%
Polo freddo	11	15%

Tabella 36 Coefficienti di ammortamento per ciascuna macroattività

I costi fissi determinati ai fini del budget standard 2017 sono riassunti nella tabella seguente relativamente a ciascuna macroattività.

	Additivi e smaltimenti	Gestione e manutenzione	Materiali	Ammortamenti	Personale	Spese generali
Impianti di produzione e distribuzione del calore	53.623	812.862	37.520	2.700.000	1.060.000	224.584
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	65.969	60.208	4.129	30.000	360.000	71.459
Distribuzione acqua industriale	1.623	40.510	43.369	-	60.000	132.709
Impianti di produzione aria compressa	37.690	80.491	6.378	300.000	660.000	40.834
Impianti di produzione aria surpressa	1.623	41.565	3.718	75.000	260.000	132.709
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	1.623	321.371	8.496	800.000	660.000	71.459
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	159.939	63.954	8.647	45.000	360.000	71.459
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	473.970	112.079	9.474	225.000	360.000	71.459
Impianto di rottura emulsioni oleose (IREO)	41.455	94.216	6.864	30.000	360.000	132.709
Polo freddo	5.623	92.606	10.286	225.000	660.000	71.459
	843.137	1.719.861	138.882	4.430.000	4.800.000	1.020.838

Tabella 37 Voci di costo fisso per ciascuna macroattività

7.1.2 Costi variabili

I costi variabili si riferiscono ai volumi di produzione: si considerano i costi relativi ai vettori primari (energia elettrica in alta tensione, gas naturale, acqua industriale) per il soddisfacimento della domanda finale e il costo medio annuo relativo all'emissione di inquinanti in atmosfera.

Per la determinazione dei costi variabili è stata necessaria, in primo luogo, la previsione dell'energia primaria da acquistare, i cui valori sono stati raggiunti utilizzando il modello Input-Output in funzione del budget della domanda finale fornito dal Cliente e riportato di seguito.

	metano tecnologico [Sm3]	aria compressa [Nm3]	energia elettrica BT [kWh]	acqua industriale [m3]	vapore tecnologico [MJ]	acqua demineralizzata [m3]
gen-17	758.289	19.153.804	19.865.483	181.128	90.621.131	7.506
feb-17	778.072	19.417.680	19.981.219	179.186	91.655.258	7.405
mar-17	797.855	19.681.555	20.096.955	177.243	92.689.384	7.303
apr-17	817.638	19.945.431	20.212.691	175.301	93.723.511	7.202
mag-17	837.421	20.209.306	20.328.428	173.358	94.757.637	7.101
giu-17	857.204	20.473.182	20.444.164	171.416	95.791.764	6.999
lug-17	876.987	20.737.057	20.559.900	169.474	96.825.890	6.898
ago-17	896.770	21.000.933	20.675.636	167.531	97.860.017	6.796
set-17	916.552	21.264.808	20.791.373	165.589	98.894.143	6.695
ott-17	936.335	21.528.684	20.907.109	163.646	99.928.270	6.593
nov-17	956.118	21.792.559	21.022.845	161.704	100.962.396	6.492
dic-17	975.901	22.056.435	21.138.581	159.761	101.996.523	6.390
	acqua refrigerata [MJ]	aria surpressa [Nm3]	GG	reflui TAR [m3]	reflui IREO [m3]	reflui IDAC [m3]
gen-17	1.173.074	532.590	453	117.144	1.346	15.150
feb-17	1.213.562	538.978	451	117.254	1.344	15.470
mar-17	1.254.050	545.365	349	117.364	1.343	15.790
apr-17	1.294.538	551.753	147	117.474	1.341	16.110
mag-17	1.335.026	558.141	-	117.584	1.340	16.430
giu-17	1.375.514	564.529	-	117.694	1.339	16.750
lug-17	1.416.002	570.916	-	117.804	1.337	17.070
ago-17	1.456.490	577.304	-	117.913	1.336	17.390
set-17	1.496.978	583.692	-	118.023	1.334	17.710
ott-17	1.537.466	590.079	135	118.133	1.333	18.030
nov-17	1.577.954	596.467	333	118.243	1.332	18.350
dic-17	1.618.442	602.855	432	118.353	1.330	18.670

Tabella 38 Budget domanda prevista dal Cliente

Attraverso la matrice dei coefficienti tecnici, basata sulle caratteristiche di generazione riferite ai consumi specifici, è stata prevista la quantità mensile di ogni vettore energetico.

$$E_{std} = M_g D_{std} \quad (7.1)$$

La formula 7.1 descrive il calcolo della quantità delle risorse primarie acquistate, vettore E_{std} , attraverso la matrice di generazione M_g e il vettore della domanda finale a budget del Cliente D_{std} .

Come accennato in precedenza, il budget considera anche le voci relative alle varianti pianificate di utilizzo:

- Per quanto riguarda la macroattività relativa all'aria compressa, i ΔU_p sono riferiti alla sostituzione di due compressori programmata per Agosto2017: in questo periodo, infatti, sono presenti giornate di chiusura aziendale del Cliente che rendono possibile la sospensione degli impianti e quindi la realizzazione di tale intervento.

- Anche nel caso della sostituzione dello scambiatore di calore in una delle centrali termiche di media pressione, l'intervento è programmato per Agosto.
- In riferimento alla pulizia dei gruppi frigoriferi, invece, l'intervento è svolto a Maggio al fine di sfruttare a pieno il miglioramento di efficienza soprattutto nei mesi estivi.

Tali interventi sono identificati come *pianificati* in quanto introdotti nel piano investimenti mesi prima dello svolgimento. Inoltre, i costi relativi ad essi sono molto significativi e, pertanto, introdotti nel piano degli ammortamenti. Evidentemente i ΔU_p sono calcolati dai mesi subito successivi ai suddetti interventi, Settembre per i primi due, Giugno per il terzo, secondo le ipotesi di risparmio spiegate nel capitolo 6.

Risultano, dalle precedenti assunzioni, i seguenti fabbisogni primari mensili:

	Energia elettrica AT [kWh]	Gas naturale [Sm3]	Acqua industriale [m3]
gen-17	26.089.015	12.020.732	293.020
feb-17	26.239.680	12.033.075	291.527
mar-17	26.020.810	10.291.890	288.554
apr-17	25.432.396	6.797.152	284.100
mag-17	25.047.253	4.266.875	280.461
giu-17	25.110.909	4.314.305	279.001
lug-17	25.266.263	4.361.723	277.541
ago-17	25.421.635	4.409.155	276.081
set-17	25.391.720	4.456.573	274.619
ott-17	26.043.345	6.793.375	275.164
nov-17	26.927.548	10.198.550	276.643
dic-17	27.442.636	11.907.883	276.637
TOT	310.433.210	91.851.287	3.373.348

Tabella 39 Fabbisogno mensile risorse primarie

Il passaggio dal punto di vista energetico a quello economico comporta la predisposizione del costo unitario standard previsto in sede previsionale: in questo caso i costi unitari di mercato relativi ai vettori primari acquistati sono stati ipotizzati pari a quelli medi del 2016, dunque:

- 0,108 €/kWh per l'energia elettrica in alta tensione acquistata da Enel;
- 0,307 €/Sm3 per il gas naturale prelevata dalla rete SNAM;
- 0,9224 €/m3 per l'acqua industriale fornita dalla società SAP.

In riferimento ai costi unitari standard, è possibile definire i valori corrispondenti ai vettori secondari, utili per l'attribuzione dei costi variabili di generazione ad ogni impianto specifico. Il costo unitario standard di un generico vettore energetico è ottenibile dalla somma del contributo variabile, imputato dunque al costo delle risorse primarie, e della componente fissa, definita nel paragrafo precedente (7.1.1) per ogni centro di consumo. Quindi:

$$c_{std} = c_{std,var} + c_{std,fisso} \quad (7.2)$$

$$c_{std,fisso} = \frac{c_{std,fisso}}{v_i} \quad (7.3)$$

$$c_{std} = c_{std,var} + \frac{c_{std,fisso}}{V_i} \quad (7.4)$$

Dove,

c_{std} è il costo unitario standard;

$c_{std,var}$ è il costo unitario standard variabile;

$c_{std,fisso}$ è il costo unitario standard fisso;

$C_{std,fisso}$ è il costo standard fisso;

V_i è il volume produttivo della generica macroattività i .

L'aspetto fondamentale del tema dei costi unitari standard risiede nel calcolo della componente variabile per cui è necessario l'utilizzo della matrice Input-Output. I costi unitari standard variabili vengono calcolati per ogni vettore nella modalità seguente:

$$c_{std,var} = c_E^T M_g \quad (7.5)$$

Dove c_E^T è il vettore trasposto dei costi unitari delle risorse primarie, composto da elementi non nulli solamente in corrispondenza di energia elettrica, gas naturale e acqua industriale:

$$c_E^T = (0,108 \quad 0,307 \quad 0,9224 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

Risultano i seguenti costi unitari standard mensili per la produzione e distribuzione di ciascun vettore energetico:

	energia elettrica BT[€/kWh]	vapore tecnologico [€/MJ]	GG [€/GG]	acqua demi [€/m3]	acqua refrigerata [€/MJ]
gen-17	0,110	0,013	5.799	1,337	0,061
feb-17	0,110	0,013	5.799	1,340	0,060
mar-17	0,110	0,013	5.799	1,344	0,060
apr-17	0,110	0,013	5.799	1,348	0,059
mag-17	0,110	0,013	5.799	1,352	0,059
giu-17	0,110	0,013	5.799	1,356	0,051
lug-17	0,110	0,013	5.799	1,361	0,050
ago-17	0,110	0,012	5.799	1,365	0,050
set-17	0,110	0,012	5.621	1,369	0,049
ott-17	0,110	0,012	5.621	1,374	0,049
nov-17	0,110	0,012	5.621	1,378	0,049
dic-17	0,110	0,012	5.621	1,383	0,048
	aria compressa[€/Nm3]	aria surpressa [€/NM3]	reflui TAR[€/r]	reflui IREO[€/m3]	reflui IDAC[€/m3]
gen-17	0,015	0,003	0,025	17,006	0,472
feb-17	0,015	0,003	0,025	16,985	0,463
mar-17	0,015	0,003	0,025	16,958	0,454
apr-17	0,015	0,003	0,025	16,939	0,446
mag-17	0,015	0,003	0,025	16,914	0,438
giu-17	0,015	0,003	0,025	16,889	0,431
lug-17	0,015	0,003	0,025	16,872	0,423
ago-17	0,015	0,003	0,025	16,848	0,416
set-17	0,014	0,003	0,025	16,815	0,410
ott-17	0,014	0,003	0,025	16,794	0,403
nov-17	0,014	0,003	0,025	16,772	0,397
dic-17	0,014	0,003	0,025	16,757	0,391

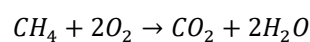
Tabella 40 Costi unitari standard per ciascuna macroattività

L'utilizzo della matrice Input-Output per il calcolo dei costi unitari standard dei vettori secondari permette la considerazione dell'efficienza degli impianti: la tabella 40, infatti, riporta il costo unitario per la produzione e la distribuzione di ciascun vettore energetico in funzione delle risorse primarie utilizzate e dei relativi costi di mercato. Un esempio rilevante è il costo di produzione dell'aria surriscaldata espresso per unità di grado giorno: in seguito all'intervento di sostituzione dello scambiatore di calore, il costo unitario standard diminuisce da 5.799 €/GG a 5.621 €/GG, indicando una produzione maggiormente efficiente e, dunque, una minore spesa di gas naturale. Chiaramente, il valore del costo unitario riferito ai gradi giorno è da considerarsi valido solo se l'impianto è collocato a Torino, come nel caso in esame: infatti i gradi giorno sono strettamente dipendenti dalla zona in analisi.

Ai fini della creazione del budget standard, viene utilizzata la voce:

$$Z_B = c_{std,var}^T D_{std} + C_{std,fisso} \quad (7.6)$$

Un ulteriore aspetto da considerare necessariamente in riferimento ai costi variabili è il costo per l'emissione di anidride carbonica in atmosfera, espresso in euro per tonnellata. Ai fini della stima di tale costo, e quindi del calcolo della quantità di anidride carbonica prodotta, è stata considerata la seguente trasformazione chimica:



Nonostante il gas naturale contenga anche piccolissime quantità di idrocarburi pesanti, quali etano, propano, butano e pentano, il suo principale componente è il metano (CH_4). A titolo di un'ipotesi di costo di emissione, è risultato sufficiente considerare solamente il bilancio riferito al metano. In particolare si ha la produzione di 1Nm³ di CO_2 ogni Nm³ di metano bruciato; considerando il coefficiente per la conversione di 1Nm³ in 1Sm³ di CH_4 e assumendo che la densità media della CO_2 sia 1,98 kg/m³, si ottengono i seguenti risultati:

	Gas naturale [Sm ³]	CO ₂ [Nm ³]	CO ₂ [t]
gen-17	12.020.732	11.382.431	22.537
feb-17	12.033.075	11.394.119	22.560
mar-17	10.291.890	9.745.391	19.296
apr-17	6.797.152	6.436.223	12.744
mag-17	4.266.875	4.040.304	8.000
giu-17	4.314.305	4.085.215	8.089
lug-17	4.361.723	4.130.116	8.178
ago-17	4.409.155	4.175.029	8.267
set-17	4.456.573	4.219.929	8.355
ott-17	6.793.375	6.432.647	12.737
nov-17	10.198.550	9.657.007	19.121
dic-17	11.907.883	11.275.575	22.326

Tabella 41 Quantitativi di anidride carbonica emessa in relazione al gas naturale bruciato

Inoltre, per il prezzo medio unitario annuo di emissione in atmosfera della CO_2 , si è considerato 5,53 €/tonn. Quindi:

	costo emissione CO2 [€]
gen-17	124.631
feb-17	124.759
mar-17	106.706
apr-17	70.473
mag-17	44.239
giu-17	44.731
lug-17	45.222
ago-17	45.714
set-17	46.206
ott-17	70.434
nov-17	105.738
dic-17	123.461
TOT	952.313

Tabella 42 Costo di emissione mensile anidride carbonica

Calcolate tutte le voci di costo. Fisse e variabili, esse sono state ordinate nel budget standard 2017 riportato di seguito.

Impianti di produzione e distribuzione del calore	costi variabili [€]	27.804.407	33.591.686
		952.313	
	costi fissi [€]	4.834.966	
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	costi variabili [€]	113.261	639.056
	costi fissi [€]	525.795	
Distribuzione acqua industriale	costi variabili [€]	102.458	379.046
	costi fissi [€]	276.588	
Impianti di produzione aria compressa	costi variabili [€]	4.087.461	5.175.163
	costi fissi [€]	1.087.703	
Impianti di produzione aria surpressa	costi variabili [€]	20.149	533.140
	costi fissi [€]	512.992	
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	costi variabili [€]	33.526.787	35.388.112
	costi fissi [€]	1.861.325	
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	costi variabili [€]	86.660	635.720
	costi fissi [€]	549.059	
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	costi variabili [€]	35.525	813.537
	costi fissi [€]	778.012	
Impianto di rottura emulsioni oleose (IREO)	costi variabili [€]	271.001	894.791
	costi fissi [€]	623.789	
Polo freddo	costi variabili [€]	893.050	1.952.401
	costi fissi [€]	1.059.351	
		TOT	80.002.652

Tabella 43 Budget standard 2017

7.2 Analisi degli scostamenti

L'analisi degli scostamenti è l'operazione conclusiva del processo di controllo e viene attuata al termine del periodo oggetto di studio, per verificare il grado di raggiungimento degli obiettivi prefissati. In particolare, tale analisi permette all'azienda di indagare e gestire le componenti responsabili della differenza tra previsioni e valori effettivi: in altri termini per *scostamento* si

intende la disuguaglianza presente tra budget e consuntivo. Il confronto tra questi valori consente la determinazione di scostamenti globali che possono, a loro volta, essere scomposti in scostamenti elementari.

L'obiettivo dell'analisi è, dunque, la valutazione delle disuguaglianze e la conseguente individuazione delle cause responsabili.

Nel seguito verranno confrontate le voci di costo Z , la cui formula è stata precedentemente introdotta nella 7.6: nonostante esse coinvolgano entrambe le componenti fissa e variabile, ai fini dell'elaborato svolto, che approfondisce e analizza il metodo Input-Output, si è assunto che i costi fissi effettivi siano pari a quelli previsti a budget in quanto tale ipotesi non influisce o penalizza in alcun modo il tema trattato.

Si consideri lo scostamento risultante dal confronto tra budget e consuntivo, ΔZ , scomponibile in tre sottocomponenti:

$$\Delta Z = (Z_{cons} - Z_{cons}^{std}) + (Z_{cons}^{std} - Z_{flex}) + (Z_{flex} - Z_B) \quad (7.7)$$

Dove

Z_{cons} è il costo totale a consuntivo;

Z_{cons}^{std} è il costo totale che si avrebbe per il soddisfacimento della domanda a consuntivo considerando il costo unitario standard;

Z_{flex} è il costo risultante dal budget flessibilizzato;

Z_B è il costo risultante dal budget standard.

Ognuna delle tre differenze costituenti la 7.7 concorre allo scostamento globale ΔZ : esse verranno studiate in seguito alla predisposizione del budget flessibilizzato e del consuntivo. [11,20]

7.2.1 Budget flessibilizzato

Come sarà approfondito in seguito, la predisposizione del budget flessibilizzato consente l'identificazione degli scostamenti di volume se confrontato con i valori ipotizzati nel paragrafo 7.1.

La flessibilizzazione del budget è permessa applicando lo stesso procedimento attuato nella creazione del budget standard, considerando però una differenza fondamentale: la domanda del Cliente per il calcolo del fabbisogno energetico è caratterizzata da valori effettivi. In altri termini, le variabili indipendenti delle equazioni di generazione del modello Input-Output non assumono valori stimati come nel caso del processo di budget standard, ma valori effettivi a consuntivo.

A tal proposito, è riportata di seguito la domanda a consuntivo dei vettori finali:

	metano tecnologico [Sm3]	aria compressa [Nm3]	energia elettrica BT [kWh]	acqua industriale [m3]	vapore tecnologico [MJ]	acqua demineralizzata [m3]
gen-17	615.302	17.711.569	21.122.770	170.534	85.267.142	10.314
feb-17	582.221	17.157.459	19.790.945	179.732	67.825.418	6.330
mar-17	692.147	20.887.651	20.788.865	187.839	53.083.076	7.892
apr-17	549.833	17.477.339	16.230.951	183.430	38.761.753	6.250
mag-17	679.512	18.687.594	21.615.015	163.219	89.159.259	9.756
giu-17	641.434	18.090.100	20.249.481	171.938	70.886.456	5.983
lug-17	760.795	22.007.835	21.267.749	179.605	55.452.047	7.454
ago-17	603.046	18.402.231	16.602.699	175.300	40.472.511	5.898
set-17	743.722	19.663.619	22.107.260	155.904	93.051.376	9.198
ott-17	700.647	19.022.742	20.708.018	164.145	73.947.495	5.636
nov-17	829.443	23.128.018	21.746.632	171.370	57.821.018	7.015
dic-17	656.260	19.327.123	16.974.448	167.170	42.183.268	5.546
	acqua refrigerata [MJ]	aria surpressa [Nm3]	GG	reflui TAR [m3]	reflui IREO [m3]	reflui IDAC [m3]
gen-17	538.624	424.172	492	115.000	1.312	18.290
feb-17	539.244	411.117	418	114.780	1.063	29.220
mar-17	605.588	503.615	256	116.590	1.092	24.400
apr-17	482.668	429.116	97	113.140	948	13.500
mag-17	612.985	444.521	-	115.431	1.307	19.835
giu-17	611.207	430.606	-	115.210	1.059	31.638
lug-17	683.796	527.210	-	117.026	1.087	26.378
ago-17	543.052	448.988	-	113.563	999	14.573
set-17	687.347	464.871	-	115.863	1.301	21.381
ott-17	683.170	450.096	152	115.640	1.054	34.056
nov-17	762.003	550.804	371	117.463	1.083	28.356
dic-17	603.436	468.859	534	113.986	1.011	15.645

Tabella 44 Consuntivo domanda del Cliente

Si procede nuovamente con il metodo Input-Output, calcolando innanzitutto il fabbisogno di risorse primarie per soddisfacimento della domanda finale:

$$E_{flex} = M_g D_{cons} \quad (7.8)$$

	Energia elettrica AT [kWh]	Gas naturale [Sm3]	Acqua industriale [m3]
gen-17	26.584.235	11.929.366	262.154
feb-17	24.860.016	9.629.091	264.089
mar-17	25.585.919	7.003.810	276.835
apr-17	19.963.540	3.687.293	261.340
mag-17	25.811.141	3.885.680	263.900
giu-17	24.071.258	3.218.704	259.649
lug-17	25.301.130	2.761.394	273.160
ago-17	20.047.317	2.107.736	254.435
set-17	26.244.142	4.099.018	261.066
ott-17	25.119.431	5.929.796	256.805
nov-17	27.290.987	9.247.571	274.017
dic-17	22.263.963	11.228.600	251.561
TOT	293.143.078	74.728.057	3.159.013

Tabella 45 Fabbisogno mensile risorse primarie

Evidentemente, la differenza presente tra il vettore della domanda finale previsto e effettivo porta a diversi valori di fabbisogno energetico e, conseguentemente, anche a costi di emissione di anidride carbonica differenti dovuti al nuovo consumo di gas naturale. Per il calcolo dei costi di emissione, riportati di seguito, sono state utilizzate le stesse assunzioni del paragrafo 7.1.

	Gas naturale [Sm3]	CO2[Nm3]	CO2[t]	costo emissione CO2 [€]
gen-17	11.929.366	11.295.916	22.366	123.684
feb-17	9.629.091	9.117.786	18.053	99.834
mar-17	7.003.810	6.631.907	13.131	72.615
apr-17	3.687.293	3.491.498	6.913	38.230
mag-17	3.885.680	3.679.351	7.285	40.287
giu-17	3.218.704	3.047.791	6.035	33.371
lug-17	2.761.394	2.614.764	5.177	28.630
ago-17	2.107.736	1.995.815	3.952	21.853
set-17	4.099.018	3.881.360	7.685	42.499
ott-17	5.929.796	5.614.924	11.118	61.480
nov-17	9.247.571	8.756.525	17.338	95.879
dic-17	11.228.600	10.632.361	21.052	116.418
			TOT	774.780

Tabella 46 Costo di emissione mensile anidride carbonica

Nel caso del budget flessibilizzato, come per il budget standard, i costi unitari delle risorse primarie sono valori stimati: si ricorda che essi sono stati ipotizzati pari alla media dei costi del 2016. I costi unitari standard dei diversi vettori energetici risultano, dunque, gli stessi riportati nella tabella 40.

La formula utilizzata per il costo finale risultante dal budget flessibilizzato è:

$$Z_{flex} = c_{std,var}^T M_g D_{cons} + C_{std,fisso} \quad (7.9)$$

Impianti di produzione e distribuzione del calore	costi variabili [€]	23.040.545,2	28.650.291
	costi fissi [€]	774.780	
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	costi variabili [€]	4.834.966	640.464
	costi fissi [€]	114.669	
Distribuzione acqua industriale	costi variabili [€]	525.795	366.174
	costi fissi [€]	89.586	
Impianti di produzione aria compressa	costi variabili [€]	276.588	4.790.029
	costi fissi [€]	3.702.327	
Impianti di produzione aria surpressa	costi variabili [€]	1.087.703	529.418
	costi fissi [€]	16.426	
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	costi variabili [€]	512.992	33.520.778
	costi fissi [€]	31.659.452	
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	costi variabili [€]	1.861.325	671.604
	costi fissi [€]	122.545	
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	costi variabili [€]	549.059	812.564
	costi fissi [€]	34.552	
Impianto di rottura emulsioni oleose (IREO)	costi variabili [€]	778.012	861.210
	costi fissi [€]	237.421	
Polo freddo	costi variabili [€]	623.789	1.493.797
	costi fissi [€]	434.446	
		TOT	72.336.329

Tabella 47 Budget flessibilizzato 2017

7.2.2 Consuntivo

Per procedere con l'analisi degli scostamenti è necessario, ovviamente, il confronto con i dati di consumo e di costo effettivi.

Di seguito si riportano i valori a consuntivo relativi al fabbisogno delle risorse primarie per il soddisfacimento della domanda finale del Cliente (Tabella 44).

	Energia elettrica AT [kWh]	Gas naturale [Sm3]	Acqua industriale [m3]
gen-17	26.757.043	12.749.580	239.766
feb-17	24.714.017	9.221.773	240.351
mar-17	25.784.000	6.775.620	254.880
apr-17	19.987.000	3.535.421	246.900
mag-17	25.553.030	4.152.844	253.344
giu-17	23.929.891	3.082.550	249.263
lug-17	25.497.006	2.671.425	262.234
ago-17	20.070.875	2.020.923	244.258
set-17	25.981.701	4.380.850	250.623
ott-17	24.971.908	5.678.961	246.533
nov-17	27.502.269	8.946.278	263.056
dic-17	22.290.126	10.766.119	241.499
TOT	293.038.865	73.982.345	2.992.707

Tabella 48 Fabbisogno mensile risorse primarie

Inoltre, è fondamentale considerare il costo unitario di mercato dei vettori primari: a tal proposito, nella tabella seguente sono riportati i costi mensili effettivi relativi all'energia elettrica, al gas naturale e all'acqua industriale.

	Energia elettrica AT [€/kWh]	Gas naturale [€/Sm3]	Acqua industriale [€/m3]
gen-17	0,090	0,276	0,947
feb-17	0,089	0,274	0,971
mar-17	0,089	0,281	0,995
apr-17	0,097	0,308	0,949
mag-17	0,095	0,318	0,947
giu-17	0,094	0,312	0,947
lug-17	0,094	0,319	0,944
ago-17	0,112	0,332	0,950
set-17	0,096	0,309	0,948
ott-17	0,093	0,317	0,947
nov-17	0,093	0,304	0,948
dic-17	0,093	0,301	0,947

Tabella 49 Costi unitari mensili per l'acquisto di vettori primari

Attraverso la tavola Input-Output sono stati ricavati i costi unitari variabili per la generazione dei vettori secondari, in riferimento al costo effettivo dell'energia primaria acquistata.

	energia elettrica BT[€/kWh]	vapore tecnologico [€/MGG €/GG]		acqua demi [€/m3]	acqua refrigerata [€/MJ]
gen-17	0,091	0,011	5.181	1,209	0,056
feb-17	0,091	0,011	5.157	1,331	0,055
mar-17	0,091	0,012	5.267	1,304	0,056
apr-17	0,098	0,012	5.772	1,342	0,059
mag-17	0,097	0,013	5.949	1,221	0,058
giu-17	0,096	0,013	5.826	1,265	0,050
lug-17	0,095	0,013	5.952	1,250	0,039
ago-17	0,113	0,014	6.249	1,304	0,051
set-17	0,098	0,012	5.603	1,243	0,044
ott-17	0,095	0,013	5.731	1,250	0,053
nov-17	0,095	0,012	5.507	1,293	0,053
dic-17	0,095	0,012	5.460	1,326	0,054

	aria compressa[€/Nm3]	aria surpressa [€/NM3]	reflui TAR[€/m3]	reflui IREO[€/m3]	reflui IDAC[€/m3]
gen-17	0,013	0,002	0,021	15,299	0,331
feb-17	0,013	0,002	0,021	17,193	0,220
mar-17	0,013	0,002	0,021	17,320	0,256
apr-17	0,014	0,003	0,023	19,827	0,471
mag-17	0,014	0,003	0,021	15,650	0,603
giu-17	0,013	0,003	0,021	14,584	0,339
lug-17	0,013	0,003	0,021	16,385	0,317
ago-17	0,016	0,003	0,025	21,783	0,888
set-17	0,013	0,003	0,022	18,406	0,550
ott-17	0,013	0,003	0,022	16,518	0,337
nov-17	0,012	0,003	0,022	16,476	0,361
dic-17	0,012	0,003	0,023	15,640	0,359

Tabella 50 Costi unitari standard mensili per la generazione dei vettori secondari

È evidente dal confronto tra le tabelle 36 e 46 che, a causa dei valori di costo unitario dei vettori primari minori rispetto a quelli previsti nel budget, la generazione dei vettori secondari si rivela più vantaggiosa.

Infine si riporta la tabella riferita al consuntivo di tutte le voci di costo, fisse e variabili, del sistema di generazione per l'anno 2017.

Impianti di produzione e distribuzione del calore	costi variabili [€]	22.038.068,3	27.640.082
		767.048	
	costi fissi [€]	4.834.966	
Impianto di trattamento acque primarie (TAP)	costi variabili [€]	110.964	636.759
	costi fissi [€]	525.795	
Distribuzione acqua industriale	costi variabili [€]	86.998	363.586
	costi fissi [€]	276.588	
Impianti di produzione aria compressa	costi variabili [€]	3.406.248	4.493.950
	costi fissi [€]	1.087.703	
Impianti di produzione aria surpressa	costi variabili [€]	14.392	527.384
	costi fissi [€]	512.992	
Trasformazione e distribuzione energia elettrica	costi variabili [€]	27.719.394	29.580.720
	costi fissi [€]	1.861.325	
Impianto di trattamento acque di carrozzeria (IDAC)	costi variabili [€]	108.133	657.192
	costi fissi [€]	549.059	
Impianto di trattamento acque reflue (TAR)	costi variabili [€]	30.250	808.262
	costi fissi [€]	778.012	
Impianto di rottura emulsioni oleose (IREO)	costi variabili [€]	226.539	850.329
	costi fissi [€]	623.789	
Polo freddo	costi variabili [€]	381.928	1.441.279
	costi fissi [€]	1.059.351	
		TOT	66.999.543

Tabella 51 Consuntivo 2017

7.2.3 Componenti di scostamento

Definiti i valori di budget ed individuate le voci effettive a consuntivo, è possibile effettuare il confronto per l'identificazione di eventuali scostamenti dal punto di vista energetico ed economico.

Riprendendo l'espressione 7.7, è evidente la presenza di tre componenti di scostamento: la differenza tra il costo totale a budget e a consuntivo può risultare principalmente da un consumo di energia diverso da quello previsto o dalla variazione del prezzo di acquisto delle materie prime. Si ricordi che le voci di costo fisso a consuntivo sono assunte uguali a quelle previste nel budget.

Lo scostamento relativo al consumo di energia primaria può derivare da due condizioni: la prima è riferita a valori di produzione differenti da quelli preventivati, la seconda si riferisce ad un'eventuale variazione di efficienza del sistema.

7.2.3.1 Scostamento di volume

La prima condizione citata, relativa ad una quantità di produzione effettiva diversa dai valori di budget, è la causa degli scostamenti di volume. Nel caso in analisi i valori finali di produzione dipendono strettamente dalla richiesta del Cliente. In particolare:

$$\Delta Z_V = Z_{FLEX} - Z_B = c_E^T M_g D_{cons} - c_E^T M_g D_B = c_{std} (D_{cons} - D_B) \quad (7.10)$$

Considerando che l'ipotesi di costo standard è la medesima per quanto riguarda il budget flessibilizzato e il budget standard, si evince che la differenza tra Z_B e Z_{FLEX} sia dovuta solamente allo scostamento di produzione finale e, dunque, di domanda del Cliente.

La differenza tra i due costi totali considerati è riassunta dal grafico seguente.

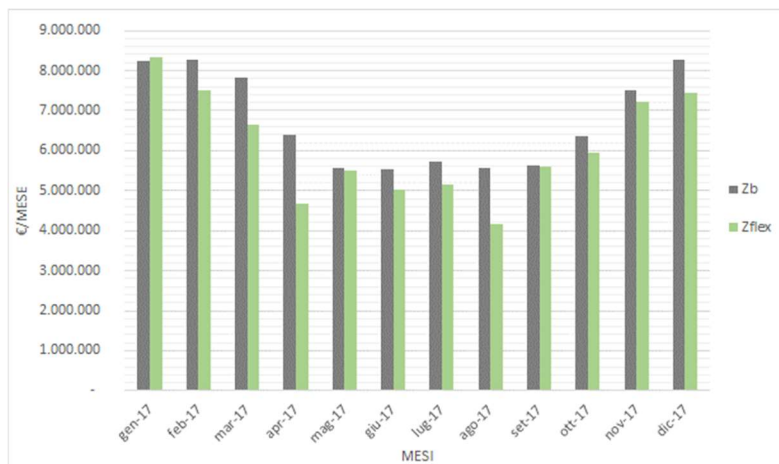


Figura 91 Confronto costi totali budget standard e budget flessibilizzato

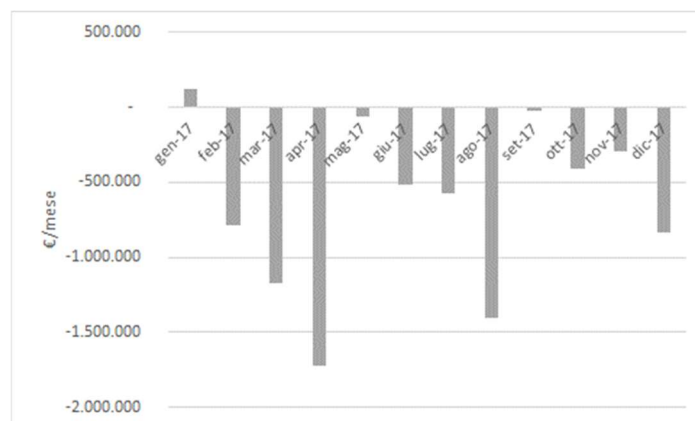


Figura 92 Analisi degli scostamenti di volume mensili

Le figure 91 e 92 consentono di apprezzare in modo veloce gli scostamenti presenti tra i valori di costo relativi al budget standard e a quello flessibilizzato: è evidente una generale diminuzione dei costi passando dal primo al secondo. Come spiegato, tali scostamenti di volume derivano dalla sbagliata previsione di domanda finale: in particolare i valori effettivi di energia frigorifera e vapore tecnologico richiesti sono nettamente inferiori rispetto a quelli previsti. Inoltre, soprattutto in riferimento ai mesi di aprile e agosto, è significativo il contributo della minore richiesta di energia elettrica in bassa tensione da parte del Cliente.

È probabile che la previsione della domanda finale sia stata effettuata in modo troppo cautelativo; sarebbe, comunque, interessante la costruzione di una tavola Input-Output anche il sistema di utilizzazione al fine di minimizzare tali errori di valutazione. Un'ulteriore ipotesi è la diminuzione di produzione del Cliente, fattore che provoca inevitabilmente ad una riduzione di consumo e, dunque, minore richiesta di vettori energetici: di seguito si riporta il progressivo degli scostamenti di volume.

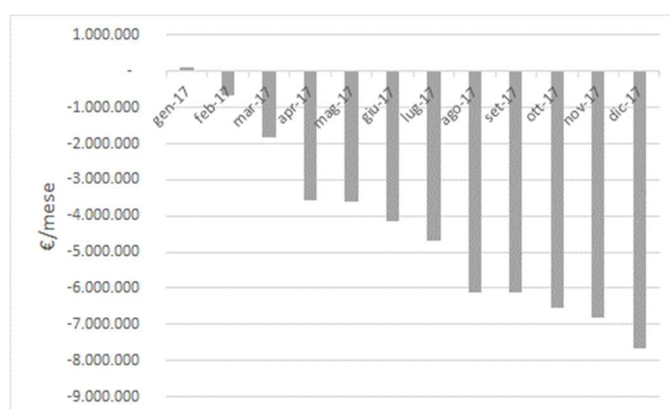


Figura 93 Somma cumulata degli scostamenti mensili di volume

Il grafico riportato permette di osservare in modo immediato l'inarrestabile aumento dello scostamento di volume negativo: a prova del cambiamento di trend indicato, è l'annuncio di un nuovo periodo di cassa integrazione per alcuni reparti dell'azienda Cliente a partire dal 2018. Si sottolinea, comunque, che nel contratto stipulato tra le due parti esiste una clausola per cui eventuali variazioni dei consumi annuali del Cliente fuori dal range compreso tra -15% e +15% rispetto alle quantità previste, e riportate in tabella 38, determinano conseguenti verifiche delle tariffe e pagamento di una penale specifica.

7.2.3.2 Delta utilizzo non pianificati

La seconda condizione responsabile dello scostamento di consumo è l'eventuale variazione delle prestazioni del sistema: gli scostamenti di efficienza evidenziano la condizione per cui la quantità fisica necessaria per la realizzazione di un'unità di prodotto è diversa da quella prevista. Essi sono

anche detti *delta utilizzo non pianificati* al fine di distinguerli da quelli pianificati descritti in precedenza, cioè riferiti a variazioni di efficienza non previsti.

Si consideri la seguente definizione di scostamento:

$$\Delta Z_{Unp} = Z_{cons}^{std} - Z_{FLEX} \quad (7.11)$$

Tale differenza deriva dal confronto tra costo a consuntivo utilizzando il costo unitario standard e costo riferito al budget flessibilizzato: a tal proposito, entrambe le voci suddette, sono riferite alla domanda finale a consuntivo; inoltre, il costo unitario standard stimato è lo stesso. Risulta, dunque, che tale differenza sia riferita ad una variazione di efficienza che determina un aumento o una diminuzione di consumo per il soddisfacimento degli stessi valori di domanda.

Il seguente istogramma riporta il confronto tra i valori mensili di Z_{cons}^{std} e Z_{FLEX} :

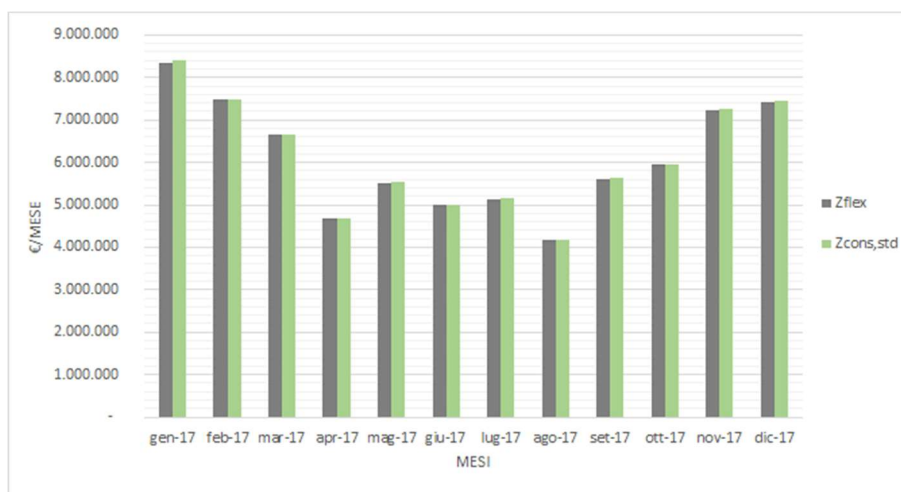


Figura 94 Confronto costi totali budget flessibilizzato e consuntivo standard

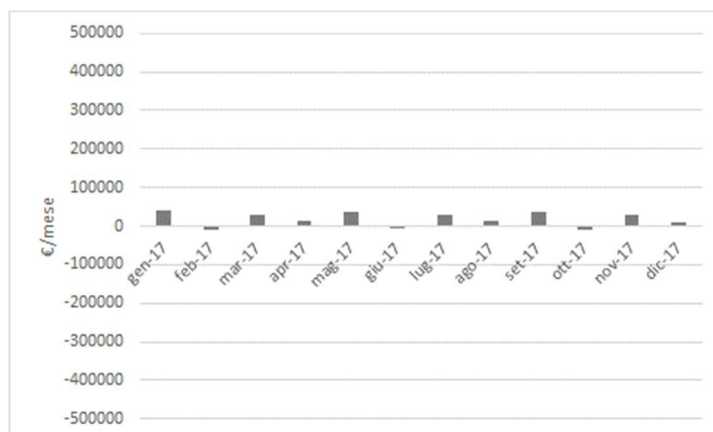


Figura 95 Analisi dei delta utilizzo non pianificati mensili

È evidente dai grafici in figura, che le variazioni di efficienza non siano particolarmente significative: gli scostamenti, infatti, risultano dell'ordine dello 0,3%.

Ai fini del tema approfondito in questo elaborato, la componente di scostamento maggiormente rilevante è la variante di utilizzo non pianificata in quanto essa evidenzia eventuali variazioni relative all'efficienza del sistema. In caso di deviazioni delle prestazioni del sistema rispetto alla baseline definita durante la caratterizzazione energetica nel capitolo 3, è necessario l'aggiornamento della caratteristica di riferimento ricavata per mezzo del modello CuSum. Innanzitutto è bene verificare l'entità di scostamento delle prestazioni da quelle di riferimento. A tal proposito, la definizione del residuo avviene relativamente alla differenza tra i valori di consumo a consuntivo e a budget flessibilizzato:

$$e_i = \Delta U = C_{cons} - C_{FLEX} \quad (7.12)$$

Per quanto riguarda lo stabilimento in analisi, i valori a consuntivo dell'anno 2017 non evidenziano significativi scostamenti relativamente alle prestazioni energetiche. Infatti, nel corso dell'anno studiato sono stati portati a termine interventi di miglioramento, i cui vantaggi sono stati considerati, però, attraverso le varianti di utilizzo pianificate. Evidentemente, in riferimento ai dati di consumo, non si sono verificate situazioni straordinarie di miglioramento o peggioramento dei consumi. È evidente, comunque, che nel caso di scostamenti rilevanti, sarebbe stato necessario l'aggiornamento della tavola Input-Output poiché, come precisato in precedenza, la correttezza dei risultati è direttamente proporzionale alla precisione nella costruzione della matrice.

Ai fini del completamento dell'analisi effettuata, si propone un'ulteriore considerazione: il delta efficienza risultante dagli interventi migliorativi effettuati durante l'anno è stato considerato attraverso le variabili di utilizzo pianificate ΔU_p ; la verifica del risparmio effettivo, stimato nel capitolo precedente, può essere elaborata considerando tali variazioni di prestazioni come variabili di utilizzo non pianificate. È stato, dunque, ricalcolato il budget flessibilizzato senza considerare tali contributi ed è stato successivamente confrontato al consuntivo standard con l'obiettivo di misurare il ΔZ_{Unp} . Gli scostamenti di efficienza mensili sono riportati nella figura seguente.

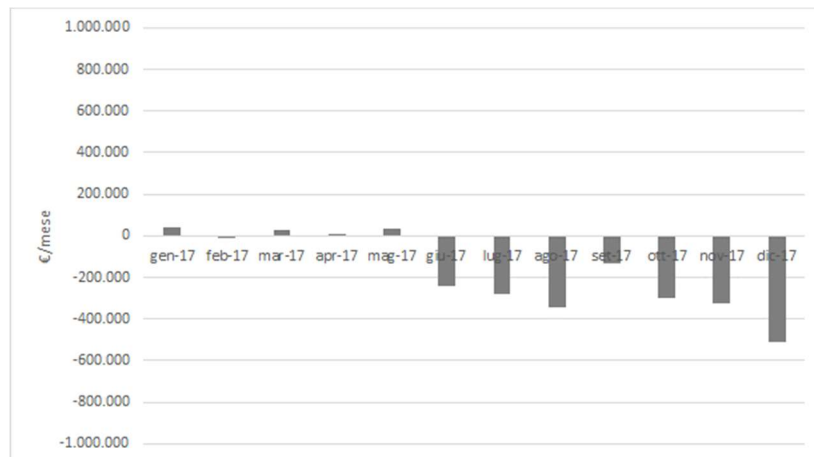


Figura 96 Analisi dei delta utilizzo non pianificati mensili

Confrontando le figure 95 e 96, è immediato osservare la significatività degli scostamenti negativi di costo nella seconda parte dell'anno: il costo consuntivo standard minore rispetto al valore relativo al budget flessibilizzato evidenzia un minor consumo di materie prime e, dunque, una migliore efficienza globale dello stabilimento. Il miglioramento è attribuibile in particolare alla pulizia dei gruppi frigoriferi che ha permesso migliori prestazioni soprattutto durante i mesi estivi, e alla sostituzione di due compressori e uno scambiatore di calore avvenuta ad Agosto. Particolarmente rilevante è lo scostamento di dicembre caratterizzato da un valore alto di gradi giorno e di richiesta di acqua surriscaldata per il riscaldamento che permette di apprezzare maggiormente il miglior funzionamento degli impianti di produzione di calore. Dall'analisi risulta un cospicuo risparmio attribuibile all'ottimizzazione energetica del valore annuale totale di circa 2 milioni di euro.

7.2.3.3 Scostamento di prezzo

Infine, è necessario introdurre la terza componente di scostamento, stavolta di natura economica. Essa deriva dal confronto tra il costo a consuntivo, Z_{cons} , e il costo a consuntivo ricavato utilizzando i costi unitari standard precedentemente ipotizzati:

$$\Delta Z_p = Z_{cons} - Z_{cons}^{std} \quad (7.13)$$

Tale differenza individua lo scostamento di prezzo presente quando il prezzo unitario delle risorse è diverso da quello del budget.

Nel seguente istogramma è presente il confronto tra i valori mensili analizzati.

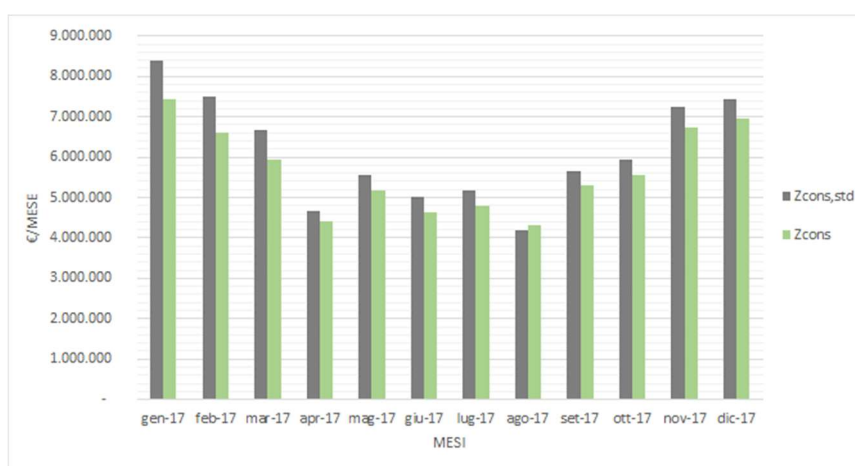


Figura 97 Confronto costi totali consuntivo standard e consuntivo

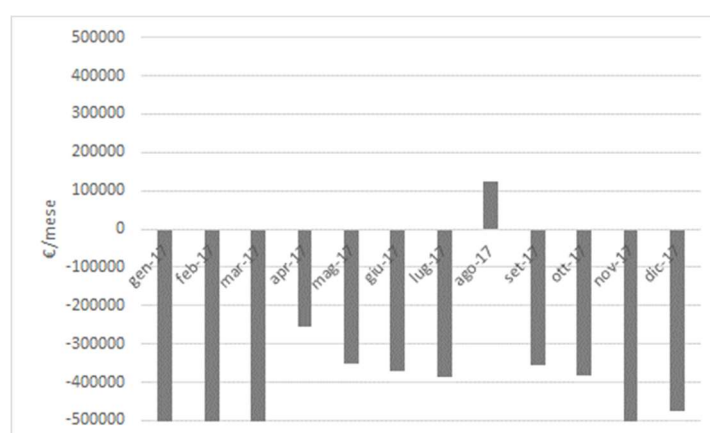


Figura 98 Analisi degli scostamenti di prezzo mensili

Gli istogrammi riportati evidenziano una significativa diminuzione globale dei costi a consuntivo rispetto a quelli risultanti dall'applicazione dei valori di costo unitari standard al consuntivo stesso. Come precisato, tali scostamenti rappresentano le differenze presenti tra i prezzi di acquisto delle materie prime previsti ed effettivi: in particolare il prezzo dell'energia elettrica in alta tensione stimato a budget è generalmente superiore rispetto ai dati effettivi. Il costo unitario standard del gas naturale risulta relativamente fedele ai valori a consuntivo, ad eccezione dei primi mesi in cui la previsione errata contribuisce alla riduzione del costo totale. Anche il prezzo d'acquisto dell'acqua industriale era stato sovrastimato in fase di budget, ma non in modo rilevante. L'unico mese caratterizzato da un costo totale a consuntivo maggiore rispetto alle aspettative è Agosto in quanto per tutti e tre i vettori primari il costo unitario è leggermente superiore di quello preventivato.

Dall'analisi effettuata, emerge la necessità di una previsione più accurata delle quantità di vettori energetici necessari al Cliente. A tal fine sarebbe interessante l'applicazione del metodo Input-Output al sistema di utilizzazione: il limite alla costruzione di un modello ugualmente preciso risiede nello svolgimento di attività totalmente diverse e nella presenza anche di piccole realtà aziendali

non appartenenti al settore automotive., che necessitano solamente dei vettori calore e freddo. In altri termini, l'indisponibilità di dati specifici di ogni attività componente il sistema di utilizzazione e dei relativi consumi, rende per ora impossibile la costruzione di un modello preciso per la corretta previsione della domanda finale da soddisfare.

Inoltre, è evidente anche in questo caso il vantaggio dell'utilizzo della tavola Input-Output: oltre alla previsione del consumo di energia primaria necessaria al soddisfacimento della domanda finale, il modello ha permesso il calcolo dei costi variabili associati alla generazione di ciascun vettore secondario. La stima di tali valori è particolarmente utile per l'identificazione degli scostamenti eventualmente presenti in riferimento ad ogni macroattività. Ancora una volta il metodo Input-Output consente di ottenere informazioni accurate relativamente ai settori specifici permettendo di selezionare eventuali campi di miglioramento in modo mirato.

8 Conclusioni

Nell'elaborato svolto è stato descritto e analizzato il metodo Input-Output e successivamente rielaborato in chiave energetica per la valutazione e la gestione di uno stabilimento industriale reale.

Lo studio del metodo è stato realizzato a partire dalle nozioni già presenti in letteratura, associando ad esse un'idea pratica ed innovativa con l'obiettivo di estenderne l'efficacia a realtà attuali di natura energetica: è risaputo, infatti, che la sensibilità e l'avvicinamento alle politiche di risparmio energetico occupino ruoli sempre più fondamentali e la gestione di processi ed impianti energivori è una pratica sicuramente necessaria a tal fine.

La valutazione dell'efficacia del metodo è stata basata sullo studio di un caso reale complesso, al fine di vagliare eventuali punti critici e di assicurare l'applicazione dello stesso a realtà più semplici. Per la costruzione della tavola Input-Output è stato inizialmente individuato il sistema di generazione alimentato da materie prime in input e costituito da tutti gli impianti responsabili della produzione e trasformazione di vettori energetici in output per il soddisfacimento della domanda del Cliente finale, o sistema di utilizzazione. Durante l'identificazione dei due sistemi si è rilevato il profondo interesse, per il futuro, alla ripetizione dell'analisi anche relativamente al sistema di utilizzazione. La matrice è stata generata attraverso l'inserimento di consumi specifici relativi ad ogni impianto di produzione, distribuzione o trasformazione oggetto di studio. Tali valori sono stati ottenuti attraverso metodi statistici applicati alle serie di dati storici disponibili. Nella maggior parte dei casi le caratteristiche di consumo finali sono risultate lineari e significative, mentre, per quanto riguarda i consumi di acqua industriale sono stati rilevati andamenti piuttosto dispersivi dovuti principalmente a recenti interventi efficientziali di ricircolo delle portate. Si segnala inoltre che, in vista della certificazione ISO 50001, lo stabilimento ha provveduto alla taratura di tutti i misuratori, alla sostituzione di quelli malfunzionanti e all'aggiunta di nuovi contatori: questo giustifica leggere imprecisioni di alcuni dei valori meno recenti della raccolta dati e l'adozione di stime semplicistiche, per esempio per quanto riguarda la caratterizzazione energetica del processo di trasformazione dell'energia elettrica. Nonostante l'introduzione di tali stime durante la caratterizzazione energetica e la presenza di lievi imprecisioni di misura, le equazioni caratteristiche ottenute sono state verificate attraverso la fase di monitoraggio ottenendo risultati positivi in tutti i casi, utilizzando il metodo CuSum.

In seguito alla determinazione dei consumi specifici e alla costruzione della matrice caratteristica del sistema di generazione, sono state svolte alcune prove per la verifica della correttezza del metodo: sono stati scelti cinque periodi temporali per il monitoraggio dei risultati, in base ai dati effettivi a disposizione. In particolare è stato selezionato l'intero 2016 e i primi quattro mesi del

2017 per i quali, al momento dell'analisi, erano già disponibili i consuntivi dei dati di consumo. La scelta di differenti basi temporali è stata determinata dalla variabilità dei consumi specifici della matrice, caratterizzati da una quota fissa, in funzione della produzione energetica richiesta sicuramente differente nel caso annuale ed in quello mensile. È apparso che, in entrambi i casi, i risultati erano caratterizzati da un'apprezzabile precisione. Il risultato è riassunto in figura 99: sono state rappresentate le percentuali di scostamento tra i dati di consumo effettivi dei periodi analizzati e i valori calcolati attraverso il metodo Input-Output. Nella maggior parte dei casi, gli scostamenti sono al di sotto del 5%: in particolare è apprezzabile la maggiore precisione dei calcoli su base mensile piuttosto che annuale; per quanto riguarda il consumo di acqua industriale, invece, come già approfondito, i delta presenti sono dell'ordine del 10% indipendentemente dal periodo considerato. Inoltre, si richiama l'attenzione agli scostamenti risultanti per quanto riguarda il vettore energia elettrica: essi assumono valori dell'1%. Globalmente si ritiene che tali risultati siano estremamente validi, riproponendosi comunque di ottenere misure più precise per quanto riguarda il consumo di acqua industriale.

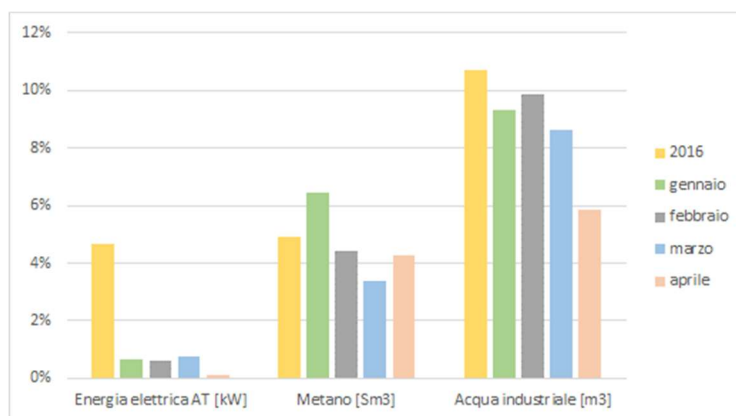


Figura 99 Percentuale di scostamento tra i dati previsti dal modello e i valori effettivi in funzione del vettore energetico e della base temporale utilizzata

Provata l'efficacia del modello, è stata proposta un'applicazione pratica del suo utilizzo come metodo di valutazione energetica ed economica. Durante i primi mesi del 2017 sono stati individuati alcuni interventi di ottimizzazione energetica per lo stabilimento, anche a fronte della certificazione ISO 50001. Ipotizzata la domanda annuale del Cliente per il 2017, la matrice di generazione è stata utilizzata per la previsione del risparmio energetico relativo a tali interventi. Come previsto, la forza del modello è la capacità di generalizzare il risparmio riferito ad un evento specifico all'interno sistema, considerando dunque ulteriori modifiche correlate in modo più o meno profondo all'oggetto dell'analisi e quantificando la reale influenza dello stesso sulla totalità dello stabilimento. Tale aspetto permette di valutare ogni tipologia di intervento relazionandolo ad un obiettivo globale e definendone, quindi, il reale vantaggio (o svantaggio). Per quanto riguarda gli interventi, nonostante

essi non costituiscano il tema principale dell'analisi, è stato affermato che essi portino a significativi risparmi energetici ed economici.

Nel caso di stabilimenti complessi come quello analizzato è particolarmente complicata la fase di predisposizione del budget in quanto essa deve essere basata sulla stima precisa dei consumi futuri: è stato proposto l'utilizzo del modello Input-Output ai fini di una previsione puntuale dei consumi, e autoconsumi, di risorse energetiche ed economiche per l'anno 2017 e, nel corso dei mesi, tale ipotesi è stata paragonata ai valori consuntivati.

Due sono i vantaggi più rilevanti: la previsione dei costi variabili è tanto più precisa quanto migliore è la stima dei consumi energetici. A tal proposito, la precisione della tavola costruita ha permesso l'ottenimento di valori di budget dettagliati per vettori primari e secondari e per prodotti destinati all'autoconsumo e all'utente finale, considerando quindi anche flussi energetici meno rilevanti difficilmente individuabili attraverso metodi standard.

Un ulteriore aspetto interessante del modello presentato è riferito all'ambito economico: le tariffe per la fornitura dei vettori energetici vengono applicate dal sistema di generazione al Cliente, comprensive di tutti gli oneri di produzione ed esposte al netto dell'autoconsumo dell'impianto. Le tariffe variabili vengono revisionate mensilmente in base al costo delle materie prime, ma comunque definite in accordo con il Cliente. Per la determinazione di valori di riferimento convenienti e specifici per ogni flusso energetico, è stata utilizzata la matrice. L'idea era quella di ottenere costi unitari standard comprensivi di tutti i dispendi economici per la produzione di ciascun vettore considerando, attraverso la matrice, eventuali autoconsumi e l'effettiva efficienza degli impianti coinvolti. Questa fase, preliminare alla decisione delle tariffe definitive, permette la determinazione di prezzi variabili competitive per il Cliente con la consapevolezza della quota minima di guadagno per lo stabilimento.

Nel corso dell'analisi dei costi, è emersa una significativa differenza tra i valori di costo del budget standard e del budget flessibilizzato: in particolare, tale differenza rappresenta lo scostamento di volume ed è emerso che un rilevante calo della produzione del Cliente, associato ad una previsione di consumo cautelativa, ha portato ad una sovrastima dei volumi richiesti con valori sensibilmente differenti da quelli effettivi.

Nonostante la consapevolezza che il calo della produzione sia responsabilità del Cliente e, per questo, non facilmente prevedibile con il metodo in analisi, si ritiene interessante l'ipotesi di una futura estensione dello stesso anche a livello del sistema di utilizzazione con l'obiettivo di prevedere il consumo di materie prime del sistema di generazione relativamente a valori di domanda finale maggiormente precisi.

In conclusione, l'elaborato svolto ha permesso di approfondire la conoscenza e l'applicazione di un metodo estremamente attuale che permette la semplificazione della descrizione, del monitoraggio e

della valutazione di stabilimenti complessi per cui i metodi standard offrirebbero risultati più superficiali. Si raccomanda l'aggiornamento costante della matrice in riferimento alle variabili di consumo in continuo cambiamento e alle modifiche impiantistiche derivanti da eventuali interventi efficientziali, sostituzioni e malfunzionamenti. Si valuta, inoltre, che il modello Input-Output, associato a precisi sistemi di misurazione, sia apprezzabilmente efficace per una vasta varietà di impianti e stabilimenti e oggetto di ottimizzazione per la gestione di diversi reparti: si pensi all'ambito della manutenzione per il monitoraggio continuo delle performances per far fronte ad eventuali ricambi ed interventi manutentivi in modo immediato, all'energy management per la previsione di opere di ottimizzazione, al controllo di gestione per la redazione di un budget preciso.

Bibliografia

- [1] D. Lgs. 4 luglio 2014, n.102, Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica

- [2] Mallone M., La diagnosi energetica come strumento per accrescere la competitività dell'impresa, in Gestione Energia, Focus diagnosi energetiche, marzo 2015

- [3] Battellino E., Il Decreto Legislativo n.102 del 2014 e le diagnosi energetiche, in Gestione Energia, Focus diagnosi energetiche, marzo 2015

- [4] Di Danto D., Diagnosi per le imprese: un obbligo da vivere come opportunità, in Gestione Energia, Focus diagnosi energetiche, marzo 2015

- [5] ISO 50001, Energy management systems-requirements with guidance for use, 2011

- [6] Leontief W., Input-Output economics, New York, OPU Usa, Seconda Edizione (dicembre 1986)

- [7] Quesnay F., Tableau Économique, Macmillan, (20 gennaio 1972)

- [8] Istat (2006), Le tavole delle risorse e degli impieghi e la loro trasformazione in tavole simmetriche, pubblicato sul sito dell'Istat

- [9] Strassoldo M., Contabilità macroeconomica e le tavole Input-Output regionali, Giuffrè, 1988

- [10] Di Cocco J., Le tavole Input-Output-La versione simmetrica, Slides del corso di contabilità nazionale, Università di Bologna

- [11] Gabriele P., Giacone E., Mancò S., Dispense del corso di gestione dei sistemi energetici, Epics, 2017
- [12] Quarteroni A., Sacco R., Saleri F., Gervasio P., Matematica numerica, Springer Verlag, Quarta Edizione, (13 marzo 2014)
- [13] Giacone E. Mancò S., Energy efficiency measurement in industrial processes, Elsevier, 2012
- [14] Negri di Montenegro G., Bianchi M., Peretto A., Sistemi energetici e macchine a fluido, Pitagora, (aprile 2009)
- [15] Pal P., Industrial Water treatment process technology, Butterworth-Heinemann, (14 aprile 2017)
- [16] Contardi C., Gay M., Ghisotti A., Robasto G., Tobasso G., Guida tecnica sui trattamenti delle acque, Edizioni Franco Angelo, Seconda Edizione, 1991
- [17] Bonomo, L., Trattamenti delle acque reflue, McGraw Hill, 2008
- [18] Carnevale Maffè C. A., Carnevale Maffè T., Statistica, Garzanti Editore, 2003
- [19] Cicchitelli G., D'Urso P., Minozzo M., Statistica: principi e metodi, Pearson, Terza Edizione, (14 settembre 2017)
- [20] Mucelli A., Moretti P., L'analisi della gestione aziendale, Sistemi Editoriali, Seconda Edizione, (21 settembre 2011)