



CirculAbility Model ©

Nota Metodologica

Sommario

| | |
|--|---|
| CirculAbility Model © | 1 |
| 1. Introduzione | 3 |
| 2. Circular Use o Fattore di Utilizzo | 4 |
| 2.1 Estensione della vita utile | 4 |
| 2.2 Sharing - piattaforme di condivisione | 5 |
| 2.3 Product as a service - prodotto come servizio | 5 |
| 3. Circular Flow o Fattore di Circolarità | 5 |
| 3.1 Input materiali | 7 |
| 3.1.1. Materiale rinnovabile (RES): | 7 |
| 3.1.2. Materiale da riutilizzo (RU _i): | 7 |
| 3.1.3. Materiale da riciclo (RC _i): | 7 |
| 3.1.4. Materiale vergine (V): | 7 |
| 3.2 Output materiali | 7 |
| 3.3 Input energia | 8 |
| 3.3.1 Fattore di conversione energia elettrica | 8 |
| 3.3.2 Fattore di conversione energia termica | 9 |
| 3.3.3 Input utilizzati | 9 |
| 3.3.3.1 Input da rinnovabili (RES_Ener): | 9 |
| 3.3.3.2 Riuso | 9 |
| 3.3.3.3 Riciclo | 9 |
| 3.3.3.4 Input da materiale vergine | 9 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.3.4 | Produzione di energia..... | 9 |
| 3.3.4.1 | Da rete..... | 9 |
| 3.3.4.2 | Autoproduzione di energia elettrica | 9 |
| 3.3.4.3 | Autoproduzione di energia termica | 10 |
| 3.3.4.4 | Energia consumata nella vita utile del prodotto | 11 |
| 3.4 | Output energia..... | 12 |
| 3.4.1 | Output inviato a riciclo (RCo_Ener): | 12 |
| 3.4.2 | Output inviato a riuso (RUo):..... | 13 |
| 3.4.3 | Scarto inviato direttamente a rifiuto (Wo_Ener): | 13 |
| 3.4.4 | Output (O) | 13 |

1. Introduzione

L'Economia circolare rappresenta una significativa opportunità per coniugare innovazione, competitività e salvaguardia dell'ambiente. Trattandosi di un ambito molto vasto e con applicazioni eterogenee, una delle principali difficoltà risiede nel definire dei criteri di misurazione della circolarità dei vari progetti o prodotti, in modo da poter individuare gli ambiti di miglioramento e definire degli obiettivi. Ad oggi non vi sono state proposte pienamente convincenti, sia perché si tratta di un tema relativamente recente sia perché la molteplicità delle applicazioni rende difficile un approccio rigoroso dal punto di vista scientifico.

ENEL sta portando avanti numerose iniziative nell'ambito dell'economia circolare e, dovendo dotarsi di un sistema di Key Performance Indicators o indicatori per gli obiettivi sopra menzionati, ha sviluppato una propria metodologia interna. Il modello nasce con l'obiettivo di andare a definire un indicatore che possa rappresentare una misurazione sintetica della circolarità del prodotto o dell'asset considerato.

Le principali difficoltà risiedono nel fatto di:

- Dover confrontare sia indicatori 'fisici' (e.g. materiali utilizzati e scarti generati) sia indicatori di utilizzo (e.g. il fattore di carico)
- Dover, nell'ambito degli indicatori fisici, includere sia i materiali sia l'energia

La soluzione più rigorosa sarebbe quella di individuare vari indici, uno per ciascuna categoria omogenea, ma questo renderebbe poco efficace lo strumento in quanto verrebbe meno l'indicazione complessiva. Si è quindi optato per l'individuazione di un unico indice sintetico, basandosi su alcune assunzioni:

- Introduzione di alcune formule 'empiriche', i.e. che non nascano da valutazioni fisiche ma funzionali all'obiettivo di un indicatore unico
- Inclusione degli aspetti energetici convertendo la componente energia nella componente di input materiale (i.e. in kg) utilizzata a monte per produrla
- Utilizzo di indicatori in numeri puri, i.e. senza grandezza fisica, mediante l'impiego di rapporti

Il modello definisce un indice finale complessivo di circolarità, Circular Index (C_i), così calcolato:

$$C_i = C_f + \frac{(1 - C_f) \times (C_u - 1)}{2 \times C_u}$$

Il rationale di questa formula è chiaramente empirico:

- Il primo addendo Circular Flow (C_f) valorizza la componente di circolarità lato input/output di materiali ed energia
- Il secondo addendo considera il complementare di C_f (quindi la componente di 'non circolarità' lato input/output di materiali ed energia) e la moltiplica per una componente che tiene conto del fattore di utilizzo, nell'ottica quindi di valorizzare il fatto che le componenti non rinnovabili vengano utilizzate il più possibile. Il fattore di utilizzo è stato definito come:

$$\frac{(C_u - 1)}{2 \times C_u}$$

Dato che è una formulazione empirica che consente di valorizzare il contributo del fattore di utilizzo ma facendolo oscillare in un intervallo ristretto indicativamente compreso tra 0 e 0,5.

Dove:

C_f , *Circular Flow*: indica la circolarità nei flussi di materiale e nei flussi di energia

C_u , *Circular Use*: indica la circolarità nell'utilizzo

2. Circular Use o Fattore di Utilizzo

Questa voce valorizza le soluzioni adottate per massimizzare il fattore di utilizzo di un asset. Il beneficio ambientale è dato dal fatto che se lo stesso bene viene utilizzato ad esempio da due persone, si dimezza il fabbisogno di materiali rispetto al caso in cui ciascuna persona avesse il proprio asset. Questo indicatore è calcolato a partire da tre indicatori:

$$Cu = \frac{L_{ex}}{L_{BAU}} \times \frac{U_{sh}}{U_{BAU}} \times \frac{U_{SAP}}{U_{BAU}}$$

Dove

- L_{ex} : vita attesa (espressa in anni) grazie ad interventi specifici di progettazione/manutenzione che consentano in maniera documentata l'estensione della vita utile dell'asset
- L_{BAU} : vita utile standard (espressa in anni) del progetto/prodotto senza le misure di cui sopra
- U_{sh} : tempo di utilizzo dell'asset (espresso come % sul tempo totale) in caso di meccanismo di sharing
- U_{BAU} : tempo di utilizzo dell'asset (espresso come % sul tempo totale) in caso Business as Usual
- U_{SAP} : tempo di utilizzo dell'asset (espresso come % sul tempo totale) in caso di meccanismo di 'service as a product'
- U_{BAU} : tempo di utilizzo dell'asset (espresso come % sul tempo totale) in caso Business as Usual

Tutti e tre i benefici sopra indicati devono essere chiaramente individuati e misurati, i.e. non devono essere fattorizzati benefici in termini generici ma ogni beneficio deve esser associato ad un intervento specifico.

2.1 Estensione della vita utile

Si riferisce alle possibili soluzioni adottate al fine di estendere la vita utile di un asset con soluzioni quali progettazione modulare, O&M predittivo, etc. deve trattarsi di soluzioni innovative e che non siano standard di mercato.

2.2 Sharing - piattaforme di condivisione

Mediante soluzioni di sharing vale a dire la condivisione di un bene tra più utilizzatori è possibile aumentare significativamente il fattore di carico. Con questo indicatore si intende valorizzare di quanto si incrementa il fattore di carico di un asset grazie all'adozione di soluzioni di condivisione.

2.3 Product as a service - prodotto come servizio

Si intende misurare il beneficio legato al fatto che l'azienda non vende più il prodotto bensì il servizio, aumentando in questo modo il fattore di utilizzo dell'asset.

3. Circular Flow o Fattore di Circolarità

Questo indicatore intende misurare la circolarità nell'utilizzo delle risorse, nell'ottica di andare a valorizzare lo sforzo di ridurre al minimo le materie non rinnovabili utilizzate e i rifiuti generati. La formula utilizzata è la seguente:

$$Cf = + \frac{\left(2 - \left(\frac{V}{T_i} + \frac{W}{T_o}\right)\right)}{2}$$

Tale indice misura il peso degli input non sostenibili sul totale degli input (V/T_i) e il peso degli scarti inviati a rifiuto sul totale degli output (W/T_o)

Dove:

- T_i : input complessivi
- T_o : output complessivi
- V : totale input da materiale vergine non rinnovabile
- W : output totali inviati a rifiuto

Che vengono così calcolati

$$T_i = RC_i^n + RU_i + RES + V$$

Dove

- RC_i^n : totale inputs netti da riciclo
- RU_i : totale inputs da riuso
- RES : totale inputs da rinnovabili e da riduzione del fabbisogno (efficienza)
- V : totale input da materiale vergine non rinnovabile

$$T_o = RC_o^n + RU_o + O + W$$

Dove

- RC_o^n : output totali inviati a riciclo (al netto del rifiuto generato nella fase di riciclo)
- RU_o : output totali inviati a riuso
- O : output inclusi nel prodotto finale

- W : output totali inviati a rifiuto

W viene calcolato come:

$$W = WRC_i + WRC_o + W_o$$

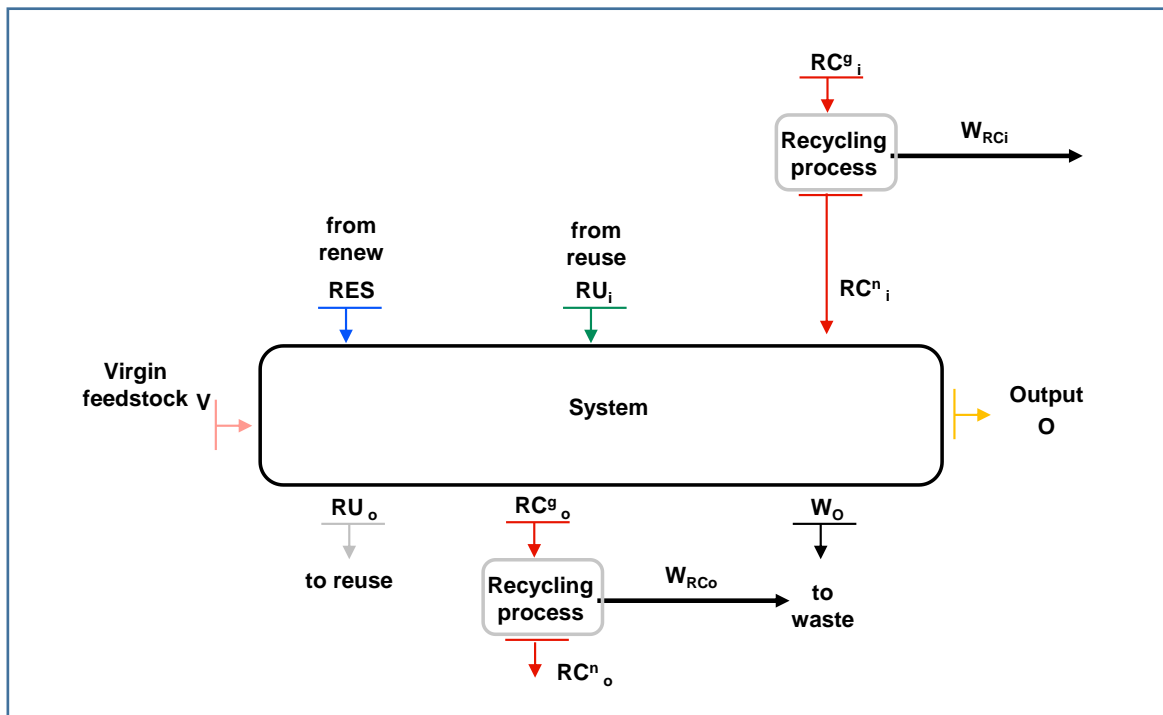
- WRC_i : rifiuto generato nella fase di riciclo a monte
- WRC_o : rifiuto generato nella fase di riciclo a valle di un proprio output
- W_o : rifiuto generato dal processo principale

Ciascuna delle voci utilizzate in circular use è data dalla somma di due componenti, la componente materiale e la componente energia

L'analisi che porta alla definizione dell'indicatore circular flow è quindi realizzata a partire da quattro sezioni, i.e.:

- Input materiali
- Input energia
- Output materiali
- Output energia

Per procedere a definire gli input di materiali, è stata fatta una rappresentazione dei possibili input e output riportata nella seguente figura:



3.1 Input materiali

Le voci considerate sono le seguenti:

3.1.1. *Materiale rinnovabile (RES):*

Indica la somma della quantità di materiale rinnovabile utilizzata. Viene calcolata moltiplicando la quantità totale in peso di ogni singolo materiale utilizzato per la relativa percentuale di provenienza da fonti rinnovabili.

3.1.2. *Materiale da riutilizzo (RU_i):*

Indica gli input da riuso, a loro volta calcolati moltiplicando la quantità totale in peso di ogni singolo materiale utilizzato per la percentuale di provenienza da materiale riutilizzato.

3.1.3. *Materiale da riciclo (RC_i):*

Questa voce indica la quantità di materiale proveniente da riciclo. Viene in primis considerato il valore di materiale da riciclo 'lordo' (RC_i^g) in uscita da un processo a monte. Viene quindi calcolato il valore netto come differenza tra RC_i^g e WRC_i (lo scarto generato nel processo di riciclo a monte). Il risultato della differenza rappresenta la quantità di materiale netta da riciclo in input al nostro processo. Tale valore viene calcolato come:

$$RC_i^g = \frac{RC_i^n}{eff_i^{rc}} = \frac{RC_i^g - WRC_i}{eff_i^{rc}}$$
$$WRC_i = \frac{RC_i^n \times (1 - eff_i^{rc})}{eff_i^{rc}}$$

- *Eff^{rc}*: si intende l'efficienza di riciclo a monte (e.g. se vi sono 10 kg di materiale in uscita da un altro ciclo produttivo e il relativo processo di riciclo ha un'efficienza dell'80%, i kg utili da riciclo saranno 8 kg)

Tale voce viene calcolata moltiplicando la quantità totale in peso di ogni singolo materiale utilizzato per la percentuale di provenienza da materiale da riciclo.

3.1.4. *Materiale vergine (V):*

E' la quantità di materiale vergine non rinnovabile che viene utilizzata in input, calcolata moltiplicando ogni singolo materiale utilizzato per la relativa percentuale di provenienza da materiale vergine.

3.2 Output materiali

Questa sezione va a misurare il contributo in uscita di ciascuna componente. Le voci considerate sono:

- *RC_o*: output di processo inviato a riciclo (al netto degli scarti nella fase di riciclo)
- *WRC_o* quantità di rifiuti generata dal processo di riciclo a valle, calcolata come:

$$WRC_o = \frac{RC_o^n \times (1 - eff_o^{rc})}{eff_o^{rc}}$$

Dove eff_o^{rc} eff riciclo è l'efficienza della fase di riciclo a valle

- RU_o : quantità di materiale inviata a riutilizzo
- O (kg): quantità di materiale inclusa nel prodotto finale
- Wo (kg): quantità di Rifiuti prodotti nel processo principale

3.3 Input energia

Per avere una gestione omogenea tra materiale ed energia l'approccio individuato è quello di ricondurre le quantità di energia alle quantità di materiali che le hanno generate in base alla fonte utilizzata

Per fare questo è necessario definire dei criteri di conversione che sono stati definiti in questo modo:

3.3.1 Fattore di conversione energia elettrica

Da dati Terna 2016 risulta che:

GENERAZIONE ITALIA 2016

| Materia prima | GWh immessi in rete | % su totale |
|---------------------|---------------------|-------------|
| Carbone | 32.149 | 10,23% |
| CCGT | 122.876 | 39,10% |
| Altro termo | 15.305 | 4,87% |
| Rinnovabili | 106.849 | 34,00% |
| Importazione | 37.083 | 11,80% |
| | | |
| Totale (GWh) | 314.261 | |

Si fanno alcune assunzioni:

- Viene considerata nulla la quantità di materia consumata per generare energia tramite fonti rinnovabili
- Il potere calorifico (pci) del materiale che ha generato l'energia in "Import" è stato calcolato come media pesata dei pci delle altre fonti energetiche.

Definiamo il fattore di conversione elettrico fc_e come il rapporto tra la quantità totale di combustibile (in kg) necessaria per la generazione di energia e la quantità totale di MWh_e immessi in rete. Quindi moltiplicando tale fattore per la quantità di energia, ad esempio utilizzata da un prodotto, è possibile calcolare la relativa necessità/consumo di materia in kg.

$$fc_e = 118,51 \text{ kg/MWh}_e$$

3.3.2 Fattore di conversione energia termica

Per quanto concerne l'energia termica si procede con un calcolo analogo prendendo però in considerazione i MWht; si ottiene dal calcolo:

$$f_{ct} = 66,72 \text{ kg/MWh}_t$$

3.3.3 Input utilizzati

Definiti i fattori di conversione, si procede a considerare le equivalenze sopra indicate e quindi a considerare i valori energetici in termini di massa (kg). Sono state individuate una serie di possibili opzioni di approvvigionamento che dovrebbero coprire le principali fonti.

3.3.3.1 Input da rinnovabili (RES_Ener):

Quantità complessiva di 'materiale equivalente' associata all' input di energia rinnovabile utilizzata.

3.3.3.2 Riuso

Quantità complessiva di materiale da riuso associata a input di energia da riuso, (RU i_Ener)

3.3.3.3 Riciclo

Quantità complessiva di materiale da riciclo associata a input di energia da riciclo, (RC i_Ener)

3.3.3.4 Input da materiale vergine

Quantità complessiva di input associate a materiale non rinnovabile, calcolata quindi come somma degli input termoelettrici

3.3.4 Produzione di energia

Le cinque voci precedenti sono calcolate a partire dalle modalità di approvvigionamento energetico individuate di seguito:

3.3.4.1 Da rete

Per l'energia approvvigionata dalla rete la conversione avviene in relazione al mix di generazione considerato ed il fattore f_{ce} sopra definito. Si assume per singolo MWhe:

- 118,51 kg di energia fossile (che confluisce poi in V_Ener)

3.3.4.2 Autoproduzione di energia elettrica

L'autoproduzione di energia elettrica può venire ricondotta a quattro tipologie:

- **Riciclo**

Input da riciclo, RC_i^e

Per calcolare l'input da riciclo si considera la quantità di energia in ingresso a monte del processo di riciclo e la si moltiplica per il fattore di conversione (f_{ce}) in modo da andare ad individuare la quantità di materia prima evitata

$$RC_i^e = \frac{ee_{riciclo} \times f_{ce}}{eff_i^{rc\ ee}}$$

Dove:

eff_i^c : efficienza del processo di riciclo
 $ee_{riciclo}$: energia elettrica da riciclo
 fce : fattore di conversione elettrico

Rifiuto da riciclo, WRC_i

Lo si calcola partendo dalla quantità di energia utilizzata per la produzione

$$WRC_{i_{ee}} = \frac{ee_{riciclo} \times (1 - \%rinnovabilità) \times (1 - eff_i^{rc\ ee})}{eff_i^{rc\ ee}}$$

- **Riuso¹**

Per la voce di riuso si assume che tutta l'energia in uscita dal processo a monte venga riutilizzata per la produzione di energia elettrica

$$ee_{riuso} \times fce$$

ee_{riuso} : energia elettrica da riuso
 fce : fattore di conversione elettrico

- **Rinnovabili (esclusa biomassa)**

Per calcolare la quantità di materia rinnovabile associata alle produzioni da fonti rinnovabili si procede a moltiplicare l'energia elettrica prodotta per il fattore fce per la % di rinnovabilità specifica

$$RES_{ener} = ee_{res} \times fce \times \%rinnovabilità$$

Nel caso in cui la % di rinnovabilità sia inferiore al 100%, la quota di non rinnovabilità viene sommata nella voce termoelettrico

- **Combustibili solidi (fossili e biomassa)**

Per questa voce va calcolata la quantità di materia vergine associata alla produzione, si procede a moltiplicare l'energia elettrica prodotta per il fattore fce

3.3.4.3 Autoproduzione di energia termica

- **Riciclo:**

Input da riciclo, RC_i^t

Per calcolare l'input da riciclo si considera la quantità di energia in ingresso a monte del processo di riciclo e la si moltiplica per il fattore di conversione (fci) in modo da andare ad individuare la quantità di materia prima evitata

¹ Con Riuso si intende l'utilizzo di una quantità di energia tal quale, mentre con Riciclo si intende che in qualche modo questa sia stata processata con relative perdite

$$RC_i^t = \frac{et_{riciclo} \times fct}{eff_i^{rc} et}$$

Dove:

$eff_i^{rc} et$: efficienza del processo di riciclo dell'energia termica

$et_{riciclo}$: energia termica da riciclo

fct : fattore di conversione termico

Rifiuto da riciclo, $WRCi_{et}$

Lo si calcola sia per la parte elettrica sia per la parte termica partendo dalla quantità di energia utilizzata per la produzione:

$$WRCi_{et} = \frac{et_{riciclo} \times (1 - \%rinnovabilità) \times (1 - eff_i^{rc} et)}{eff_i^{rc} et}$$

- **Riuso**

Si moltiplica la quantità di energia termica inviata a riuso per il fattore di conversione termico fc_t

$$et_{riciclo} \times fct$$

- **Da rinnovabile**

Per calcolare la quantità di materia rinnovabile associata alle produzione da fonti rinnovabili si procede a moltiplicare l'energia elettrica prodotta per il fattore fc_e per la % di rinnovabilità specifica

$$et_{res} \times fct \times \%rinnovabilità$$

Nel caso in cui la % di rinnovabilità sia inferiore al 100%, la quota di non rinnovabilità viene sommata nella voce termoelettrico

- **Termo**

Su questa voce si assume che sia direttamente disponibile la quantità di combustibile utilizzato, si prevede quindi di inserire direttamente l'indicazione dei Kg di combustibile fossile utilizzati

3.3.4.4 Energia consumata nella vita utile del prodotto

Dal momento della sua produzione al fine vita utile, a seconda del tipo di output prodotto, potremmo avere diverse situazioni riguardo il fabbisogno energetico:

- Output che non ha bisogno di ulteriori forme di energia (es. oggetto statico)

- Output che necessita di energia elettrica per il funzionamento (es. meccanismo elettrico)
- Output che necessita di combustibile per generare energia per il funzionamento (es. veicolo)

Nel primo caso nessuna altra considerazione è necessaria.

Nel secondo caso i calcoli da fare sono del tutto analoghi a quelli esposti per gli input di energia in fase di analisi del processo.

Nel terzo caso si suppone di poter calcolare direttamente la quantità in peso di combustibile fossile necessario al funzionamento. Tali kg di materiale si sommeranno interamente alla quantità di materiale vergine necessario in input.

Sia nel secondo caso che nel terzo potrebbe essere necessario convertire l'energia generata in un'altra forma di energia (meccanica) tramite un motore, in questo caso è necessario considerare che non tutta l'energia convertita sarà effettivamente utilizzata ed andrà valutato un opportuno rendimento del motore/conversione al fine da valutare la quantità di energia effettivamente utilizzata e quella persa sotto altre forme (es. attriti, calore). L'energia persa per efficienza di conversione <1, va a sommarsi alla componente di rifiuti in uscita dal processo.

3.4 Output energia

Sugli scarti energetici si sono considerate tre componenti:

- gli scarti termici inviati a riciclo
- gli scarti termici inviati a riuso
- gli scarti termici non recuperati

gli indicatori finali utilizzati sono:

3.4.1 Output inviato a riciclo (RCo_Ener):

Output a riciclo, RCo

Si intende la quantità di energia di scarto di processo che viene riciclata e utilizzata in input in un processo successivo

Viene calcolato a partire dalla quantità di calore di scarto generata nella fase di riciclo sia nel processo di autoproduzione di energia elettrica sia nel processo di autoproduzione di energia termica, calcolato come

$$RCo = RCo_{el} + RCo_t$$

$$RCo_{el} = ee \times fce$$

$$RCo_t = et \times fct$$

Rifiuto da riciclo, WRCo

Si intende lo scarto generato nella fase di riciclo

Viene calcolato considerando lo scarto generato dal riciclo, sia per quanto concerne il processo di produzione di energia elettrica sia per quanto concerne il processo di produzione di energia termica

$$\frac{RCo_{el} \times (1 - eff_o^{rc} ee)}{eff_o^{rc} ee} + \frac{RCo_{et} \times (1 - eff_o^{rc} et)}{eff_o^{rc} et}$$

3.4.2 Output inviato a riuso (RUo):

Si intende la quantità di energia di scarto di processo che viene inviata a riuso e utilizzata in input in un processo successivo

Viene calcolato a partire dalla quantità di calore inviata a riuso sia nel processo di autoproduzione di energia elettrica sia nel processo di autoproduzione di energia termica, calcolato come

$$RUo = RUo_{el} + RUo_{t}$$

$$RUo_{el} = ee \times fce$$

$$RUo_{et} = et \times fct$$

3.4.3 Scarto inviato direttamente a rifiuto (Wo_Ener):

Si intende lo scarto che viene direttamente inviato a rifiuto. Gli scarti termici non recuperati, i.e. quelli dispersi nell'ambiente, vengono valorizzati come

$$Wo_{ener} = ee \times fce + et \times fct$$

3.4.4 Output (O)

Si intende la somma degli output energetici per cui il processo è finalizzato. E' un parametro da valorizzare nel caso in cui l'oggetto di applicazione sia una centrale elettrica o termica. Vanno inseriti direttamente i valori di energia elettrica e termica in uscita, che vengono poi convertiti in materiale equivalente mediante i fattori di conversione definiti

$$O_{Ener} = O_{ee} + O_{et}$$

$$O_{el} = ee \times fce$$

$$O_{et} = et \times fct$$

Questo documento è di proprietà di Enel S.p.A. con sede in Roma, V.le Regina Margherita 137, che è l'unica titolare del diritto d'autore.

Il suo contenuto, a titolo esemplificativo ma non esaustivo, testo, formule matematiche, soluzioni metodologiche, figure e ogni altro elemento, è protetto ai sensi della normativa in tema di diritto d'autore e può essere utilizzato esclusivamente per uso personale. È assolutamente vietato copiare, appropriarsi, ridistribuire e riprodurre qualsiasi frase o formula presente nel documento e ogni utilizzo dello stesso per fini commerciali.

Qualora s'intenda pubblicare il testo del documento nella sua interezza o per estratto, on line o in formato cartaceo, è necessario richiedere una espressa autorizzazione al titolare dei diritti d'autore e in ogni caso, qualora riprodotto, il materiale autorizzato dovrà sempre recare le indicazioni proprietarie.

Enel non assume responsabilità sull'utilizzo e sui risultati dell'applicazione di tale modello che è stato redatto da Enel per finalità di studio e ricerca.