

# Economia circolare e fabbisogno energetico. Quale correlazione?

JACOPO ZOTTI

## 1. INTRODUZIONE

L'economia circolare si presenta come una grande opportunità. L'idea che rappresenti un nuovo modello di sviluppo trova sostegno in molti ambienti. A livello accademico, solo il numero delle pubblicazioni dell'ultimo quinquennio è sufficiente a confermare l'interesse per il tema, come indicato da diversi autori (ad esempio, Winans *et al.*, 2017; Geissdoerfer *et al.*, 2016; Reike *et al.*, 2018). Nel mondo imprenditoriale, multinazionali e società di consulenza (come, ad esempio, Accenture, Deloitte, Ernst & Young, McKinsey & Company) sono convinte delle opportunità di crescita e di profitto derivanti da questo nuovo modello<sup>1</sup>. L'appoggio di cui gode l'economia circolare influenza pure diverse organizzazioni internazionali (OCSE, BEI, OSCE) e la stessa Commissione Europea che, già a fine 2015, ha adottato "An EU Action Plan for the Circular Economy". A livello nazionale, diversi governi stanno seguendo questo indirizzo. L'Italia, ad esempio, ha recentemente pubblicato il documento "Verso un modello di economia circolare per l'Italia" (MATTM & MiSE, 2017).

---

<sup>1</sup> Nel loro libro (Lacy e Rutqvist, 2015), Lacy e Rutqvist promettono 4,5 trilioni di dollari di vantaggi economici derivanti dalla realizzazione dell'economia circolare da qui al 2030.

Complessivamente, l'economia circolare viene presentata come un modello di sviluppo innovativo, che ha tutte le potenzialità di ridurre l'impatto ambientale derivante dalle attività economiche, garantendo al tempo stesso prosperità e occupazione. Tanto convinto è l'entusiasmo per l'economia circolare, tanto profonda è, però, la fragilità dell'evidenza scientifica relativamente al suo contributo sui diversi versanti della sostenibilità ambientale, della prosperità economica e dell'equità sociale. Nonostante il dibattito scientifico conti ormai centinaia di contributi, la nebulosità che lo caratterizza è notevole. Tranne qualche eccezione (Haas *et al.*, 2015), i primi (e comunque pochi) lavori che segnalano esplicitamente questo tipo di criticità si contano a partire dal 2017 (Kirchherr *et al.*, 2017; Reike *et al.*, 2018). La confusione nel dibattito riguarda almeno tre aspetti, che sono: il concetto stesso di economia circolare, le modalità per la sua realizzazione e le sue possibili finalità. Per quanto riguarda il primo punto, Haas *et al.* (2015, p. 766), ad esempio, riferiscono di una sostanziale mancanza di definizioni chiare di economia circolare. Kirchherr *et al.* (2017), d'altro canto, in un lavoro di meta-analisi, ne rintracciano addirittura un centinaio<sup>2</sup>. Per quanto riguarda gli strumenti di realizzazione dell'economia circolare, tra i primi contributi che si prefiggono di fare chiarezza su questo tema, va ricordato il recente lavoro di Reike *et al.* (2018), che, però, si occupa "solamente" di quelli che iniziano con il prefisso "ri" (riciclare, riusare, ricondizionare...), individuandone, comunque, 38. Quanto alle possibili finalità dell'economia circolare, queste spaziano, senza troppa evidenza scientifica in merito (Geissdoerfer *et al.* 2017), dalla sostenibilità ambientale alla crescita economica, includendo la sicurezza nazionale relativa alle risorse naturali e l'efficienza nel loro uso (Heshmati, 2015). Nel caso della sostenibilità ambientale, ad esempio, autori convinti che l'economia circolare sia una delle "low-carbon development strategies" (Winans *et al.*, 2017) coesistono con autori (come, ad esempio, Allwood, 2014), secondo i quali le emissioni potrebbero addirittura aumentare in seguito all'introduzione dell'economia circolare.

In tema di emissioni, una voce importante è rappresentata da quelle derivanti dalla produzione di energia. L'80% del totale delle fonti utilizzate a questo scopo deriva, a livello globale, da risorse non rinnovabili (Enerdata, 2017) – petrolio, carbone, gas. Ciononostante, il dibattito sull'economia circolare non sembra interessato a studiarne le possibili implicazioni sul fabbisogno energetico<sup>3</sup>. Kirchherr *et al.* (2017, p. 227), ad esempio, quando analizzano le finalità dell'economia circolare, includono la prosperità economica e la quali-

---

<sup>2</sup> Precisamente, si tratta di 95 diverse definizioni

<sup>3</sup> Per fabbisogno energetico, intendiamo la quantità di energia che il sistema economico produce.

tà ambientale, ma ignorano la questione energetica. Heshmati (2015), invece, ritiene che l'economia circolare sia quella in cui *tutta* l'energia deriva da fonti rinnovabili, riconoscendo, d'altro canto, che l'economia circolare ha bisogno di energia per la propria realizzazione. Preston (2012) sembra implicitamente condividere il punto di vista di Heshmati (2015), osservando sbrigativamente che "The remaining energy needed for a CE [circular economy] would be provided by renewable sources." (Preston, 2012: 3)." Allwood (2014), per contro, prospetta la possibilità di una domanda crescente di energia in seguito, ad esempio, all'avvio di alcune attività di riciclaggio. In considerazione dell'andamento comunque crescente (a livello globale) del consumo di energia (Enerdata, 2017), il silenzio attorno al rapporto tra economia circolare e fabbisogno energetico risulta assordante e interessante al tempo stesso. È assordante perché le politiche per la promozione dell'economia circolare, pur (ad oggi) non così incisive, sono già in essere, nonostante la carenza di evidenza scientifica in merito. È interessante perché, da un punto di vista scientifico, rappresenta senza dubbio una motivazione importante per una prima riflessione sul tema, obiettivo del presente capitolo.

L'analisi degli effetti dell'economia circolare sul fabbisogno energetico pone due questioni preliminari, che non possono essere trascurate. Innanzitutto, va chiarita la nozione di economia circolare. Diversamente, qualunque riflessione sui suoi effetti sul fabbisogno energetico apparrebbe teoricamente fragile. In secondo luogo, va elaborato un metodo per studiare questi effetti. Per comprendere l'essenza dell'economia circolare, procediamo ad un'analisi critica di questo concetto e ne mettiamo in luce un'importante debolezza teorica. Se, da un lato, non v'è dubbio che economia circolare significhi presenza di flussi circolari (circoli) di energia e materia nell'economia<sup>4</sup>, dall'altro, l'idea che questi possano essere chiusi (come sostenuto da più parti<sup>5</sup>) risulta priva di fondamento. Sulla base di queste osservazioni, proponiamo di sostituire la nozione di *economia circolare* con quella di *circolarità di un'economia*, che definiamo come quella caratteristica del sistema economico che consiste nella presenza, al suo interno, di flussi circolari (non chiusi) di materia e di energia. Lo scopo di questi circoli è trattenere materia ed energia all'interno del sistema economico, al fine di ritardare il loro ritorno nell'ambiente. Nel resto del capitolo, prediligeremo il termine *circolarità* (di un'economia), con la consapevolezza, naturalmente, che una dismissione del termine *economia circolare*

---

<sup>4</sup> Non vi sarebbe ragione, infatti, di definire "circolare" l'economia.

<sup>5</sup> Tra le pubblicazioni in riviste con revisione tra pari citiamo ad esempio, Geissdoerfer *et al.* (2017), Geng e Doberstein (2008), Yuan *et al.* (2008) e Frosch (1992). Tra i documenti di diverse organizzazioni internazionali ricordiamo EIB, 2017; OECD, 2009.

non sarebbe certamente possibile. Accettando entrambi i termini, ricordiamo, però, che quello attualmente in uso manca di consistenza teorica.

Un aspetto importante della nozione di circolarità è la sua separazione dal concetto di *strategia di circolarità*, che definiamo come lo strumento (la modalità) per la sua realizzazione. Strategie sono, ad esempio, il riciclaggio, il riuso, il ricondizionamento. Per quanto intuitiva, questa separazione è fondamentale perché permette di elaborare un nuovo approccio metodologico per l'analisi di qualunque effetto derivante da una variazione nel livello di circolarità. Oggetto della valutazione diventano, infatti, le strategie impiegate per la sua realizzazione concreta. Nel nostro caso, ciò significa studiare le implicazioni delle diverse strategie sul fabbisogno energetico. A questo scopo, suddividiamo le strategie in due grandi categorie. La prima comprende quelle per il mantenimento dell'energia nel sistema economico, come, ad esempio, l'estrazione di energia da rifiuti e il recupero di energia residua mediante processi a cascata. La seconda include quelle per la conservazione della materia (riciclaggio, riuso, ricondizionamento...).

Il risultato più importante di questo capitolo consiste nel rivelare la sostanziale ambiguità, dal punto di vista teorico, del rapporto tra circolarità e fabbisogno energetico. Questa incertezza è una diretta conseguenza del fatto che la circolarità può essere implementata attraverso una miriade di strategie diverse, ognuna delle quali con caratteristiche ed effetti specifici. Per quanto riguarda le strategie per il mantenimento dell'energia (circolarità energetica), è plausibile ritenere che comportino una riduzione del fabbisogno. Non si può dimenticare, tuttavia, che in alcuni casi (come, ad esempio, in quello del recupero di energia da rifiuti), questo bilancio favorevole si accompagna a implicazioni gravi per l'ambiente e per la salute umana. Nel caso delle strategie di circolarità della materia, il quadro è diverso perché i loro effetti sul fabbisogno sono intrinsecamente ambigui. Tranne rare eccezioni, infatti, questo tipo di strategie necessita di energia (si pensi, ad esempio, a un impianto di riciclaggio). Sebbene sia presumibile che una strategia di circolarità comporti una riduzione dell'attività non circolare corrispondente (che prevede cioè la produzione da risorse naturali vergini), il risultato complessivo non è chiaro a priori. La riduzione del fabbisogno energetico derivante dalla diminuzione dell'attività non circolare potrebbe compensare solo in parte l'aumento del fabbisogno dovuto all'attività produttiva circolare. Alcuni esempi di implementazione della circolarità bastano per suffragare la tesi dell'ambiguità del nesso con il fabbisogno energetico. La quantificazione degli effetti energetici risulta, infatti, limitata a singoli casi specifici, apparentemente senza possibilità di generalizzazione. In alcuni studi, la questione in discorso non è nemmeno

considerata. È legittimo concludere che il rapporto tra circolarità e fabbisogno di energia, oltre ad essere teoricamente ambiguo, è noto solamente in parte.

La sezione seguente approfondisce il concetto di circolarità e la successiva presenta l'approccio metodologico per l'analisi dei suoi effetti sul fabbisogno energetico. La sezione 4 discute del rapporto tra circolarità e fabbisogno energetico a livello teorico, mentre la sezione 5 presenta una breve rassegna di studi che ne quantificano gli effetti in alcuni casi specifici. La sezione 6 è dedicata ad alcune conclusioni e chiude il lavoro.

## 2. IL CONCETTO DI CIRCOLARITÀ DI UN'ECONOMIA

L'obiettivo di questa sezione è di tipo metodologico. Consiste nell'illustrare il concetto di circolarità e nel mostrare come questo si inserisca in maniera coerente nella teoria dell'economia dell'ambiente e delle risorse naturali.

Come anticipato nell'introduzione, la *circularità di un'economia* indica la presenza di flussi circolari (circoli) di materia ed energia. La principale motivazione per prediligere la nozione di circolarità sta nel fatto che, contrariamente a quanto sostenuto generalmente dal dibattito sull'economia circolare, i circoli interni al sistema economico non possono essere chiusi. Già Georgescu-Roegen (1971) e Daly (1977) spiegavano l'irrealizzabilità di circoli chiusi da un punto di vista fisico (termodinamico). Più recentemente, altri autori quali, ad esempio, Andersen (2007) e Allwood (2014) hanno aggiunto, a questi argomenti, motivazioni di ordine tecnico, economico e ambientale. Se i circoli non possono essere chiusi, energia e materia sono destinate (almeno in parte) a lasciare l'economia per tornare nell'ambiente. In termini termodinamici, cioè, l'economia non può esistere come sistema completamente isolato dall'ambiente. Se, quindi, un'economia completamente circolare non è realizzabile, lo stesso concetto teorico si rivela irrilevante o, quantomeno, impreciso e giustifica la nozione di circolarità.

Si noti che la circolarità è una caratteristica *continua* dell'economia nel senso matematico del termine. Può essere, cioè, misurata attraverso una scala di valori reali, che, nel caso considerato, sono compresi tra zero (incluso) e uno (escluso). Il valore zero indica assenza di circolarità mentre il valore uno individua la situazione (ideale) di circolarità completa, nella quale i circoli sono chiusi. Ogni economia presenta un proprio grado di circolarità, solitamente diverso da zero. È questo il caso dei Paesi dell'Unione Europea come illustrato, ad esempio, in Zoboli (2018) e in Di Maio e Rem (2015). In quanto variabile economica, la circolarità può modificarsi o endogenamente o in seguito a interventi di politica economica. Si osservi che la presenza di flussi

circolari all'interno dell'economia è pure caratteristica fondamentale dell'economia circolare, che non avrebbe altrimenti ragione di definirsi tale<sup>6</sup>.

Il concetto di circolarità diventa più chiaro se lo si inserisce nella teoria dell'economia dell'ambiente e delle risorse naturali. Il quadro di riferimento a questo scopo è dato dal *modello del bilancio dell'energia e dei materiali* (Ayres e Kneese, 1969 e Kneese *et al.*, 1970). Il modello di Ayres e Kneese descrive il rapporto tra economia e ambiente in prospettiva termodinamica. Entrambi rappresentano sistemi aperti, che scambiano reciprocamente materia ed energia. Per la prima legge della termodinamica, la materia che l'ambiente cede all'economia (in forma di risorse naturali) viene restituita da quest'ultima in forma di rifiuti (con effetti solitamente dannosi) e di energia. Le risorse naturali, infatti, vengono impiegate nella produzione di beni e servizi e, salvo eccezioni, tutti i beni prodotti (sia per il consumo finale che per l'impiego industriale) sono destinati a diventare rifiuto, come rifiuto sono gli scarti di produzione.

Il modello di Ayres e Kneese mette in luce il ruolo dell'ambiente come fornitore di risorse naturali da un lato e come serbatoio di rifiuti dall'altro. Se si tiene conto di questa duplicità di funzioni, il modello del bilancio dell'energia e dei materiali può essere agevolmente linearizzato al fine di ottenere una sequenza ordinata costituita dall'ambiente (come fornitore di risorse), dal sistema economico e, infine, nuovamente, dall'ambiente (come serbatoio di rifiuti). In questo schema, i flussi di materia e di energia che si dipartono dall'ambiente, attraversano il sistema economico e proseguono verso l'ambiente, secondo uno schema unidirezionale. La forma linearizzata del modello del bilancio dell'energia e dei materiali permette di illustrare più intuitivamente lo scopo della circolarità, che è quello di mantenere energia e materia all'interno del sistema economico, ritardando il loro ritorno all'ambiente. Allo stesso tempo, permette di mostrare l'ambiguità degli effetti della circolarità sul fabbisogno energetico. Il mantenimento della materia all'interno dell'economia comporta infatti, da un lato, un aumento del fabbisogno (dovuto all'attività circolare), dall'altro una sua riduzione in virtù della sostituibilità con la corrispondente attività non circolare.

La definizione di circolarità che proponiamo è molto parsimoniosa e, allo stesso tempo, è coerentemente fondata nel modello del bilancio energia/materiali. Il concetto di economia circolare, purtroppo, non presenta altrettanto solide basi teoriche, al punto che diversi autori (a partire da Andersen, 2007) at-

---

<sup>6</sup> Merita osservare, comunque, che non tutte le definizioni di economia circolare indicano la circolarità dei flussi all'interno del sistema economico come una peculiarità della economia circolare. Così dev'essere nel caso delle 95 definizioni studiate da Kirchherr *et al.* (2017), che non menzionano la circolarità dei flussi tra gli aspetti caratterizzanti dell'economia circolare.

tribuiscono il concetto di economia circolare a Pearce e Turner (1989). È vero che questi autori, nel loro manuale di Economia dell'Ambiente e delle Risorse Naturali, impiegano il termine *economia circolare*. Tuttavia, il significato che gli attribuiscono non coincide con quello con cui viene inteso nell'attuale dibattito sull'economia circolare, ma si riferisce alla circolarità della relazione tra economia e ambiente come descritta dal modello del bilancio dell'energia e dei materiali.

### 3. L'APPROCCIO METODOLOGICO PER LO STUDIO DEGLI EFFETTI DELLA CIRCOLARITÀ SUL FABBISOGNO ENERGETICO

Come anticipato nell'introduzione, lo studio del rapporto tra circolarità e fabbisogno energetico consiste nell'analisi degli effetti delle strategie e, in particolare, degli specifici progetti attraverso i quali queste vengono implementate nella realtà. L'applicazione di questo approccio metodologico presuppone naturalmente che le iniziative considerate siano effettivamente strategie di circolarità. Vista la confusione che caratterizza anche questo aspetto del dibattito sull'economia circolare (Reicke *et al.* 2018), questa non è una questione di poco conto. Spesso, infatti, il dibattito tende a far proprie iniziative che, di fatto, non incidono sulla circolarità di un'economia. La più importante tra queste è la *riduzione* perché il principio su cui si basa caratterizza diverse iniziative, tutte non pertinenti al concetto di circolarità. Queste sono, ad esempio, l'aumento nell'impiego di fonti di energia rinnovabile e l'aumento dell'efficienza energetica attraverso il miglioramento tecnologico.

Come noto, il principio della riduzione consiste nella diminuzione dei flussi che attraversano l'economia (risorse naturali in entrata, rifiuti in uscita). Il concetto di riduzione implica *per definizione* che un'economia può promuovere iniziative di questo tipo senza che ciò incida (almeno a livello di impatto diretto) sul suo grado di circolarità. Per questo, includere il principio della riduzione tra le strategie di circolarità risulta concettualmente errato. Inoltre, una maggiore circolarità può implicare una diminuzione di alcuni flussi ma un aumento di altri. Una politica di riduzione, invece, comporta necessariamente un abbattimento di un qualche flusso (danno ambientale). Confondere, quindi, politiche di circolarità con politiche di riduzione può rivelarsi fuorviante e oltremodo dannoso. Per queste ragioni, contrariamente a quanto sostenuto dalla maggior parte della letteratura, il presente lavoro ritiene che la circolarità non debba includere il principio della riduzione.

Un maggior impiego di fonti di energia rinnovabile non comporta, in linea di principio, una maggior circolarità e può caratterizzare una qualunque eco-

nomia, anche quella con circolarità nulla. L'impiego di energia solare a scapito di una fonte fossile, ad esempio, rappresenta solamente una sostituzione di una fonte energetica con un'altra. A parità di energia prodotta, l'impiego di fonti rinnovabili significa una riduzione dei flussi di risorse naturali che entrano nell'economia e che sono quindi destinati a trasformarsi in inquinamento (solido, liquido o aeriforme). Per questo, un (maggior) impiego di fonti rinnovabili va ascritto alla sfera della riduzione, non a quella della circolarità. Va osservato, comunque, che molti autori (quali, ad esempio, Ghisellini *et al.*, 2016; Heshmati, 2015; Zhu e Qiu, 2007) includono l'energia rinnovabile tra le caratteristiche dell'economia circolare. Tra questi, merita ricordare in particolare coloro<sup>7</sup> che riportano, nei propri lavori scientifici, la definizione di economia circolare data dalla Ellen MacArthur Foundation (EMF)<sup>8</sup>. Nonostante questa definizione sia priva di qualunque fondamento scientifico-teorico, molti autori (ad esempio, Geissdoerfer *et al.*, 2017; Schut *et al.*, 2015) la ritengono "the most prominent CE definition" (Kirchherr *et al.*, 2017, p. 226).

Nel caso di un aumento dell'efficienza energetica, vanno distinti due casi. Se questo è dovuto a strategie quali, ad esempio, l'estrazione di energia da rifiuti o il suo recupero mediante processi a cascata, allora rientra tra le strategie di circolarità. Se, viceversa, è ottenuto, ad esempio, attraverso l'installazione di impianti produttivi più efficienti (a livello di singola impresa), questo non rappresenta un esempio di realizzazione della circolarità perché non vi è mantenimento di energia nel sistema economico ma semplicemente riduzione nel consumo. In Cina, ad esempio, impianti piccoli e poco efficienti sono stati sostituiti con impianti di maggiori dimensioni e più efficienti. Queste iniziative non prevedono il mantenimento dell'energia nel sistema economico ma solamente un suo uso più efficiente, contrariamente a quanto affermato da Su *et al.* (2013) e poi ripreso da Heshmati (2015) e da Ghisellini *et al.* (2016), che presentano queste iniziative tra i successi dell'economia circolare<sup>9</sup>.

---

<sup>7</sup> Secondo Kirchherr *et al.* (2017), questi autori sono Charonis (2012), EMF (2014), EUKN (2015), Schut *et al.* (2015), Hobson (2016), Cullen (2017), Goldberg (2017), Moreau *et al.* (2017), Niero *et al.* (2017) e Skene (2017).

<sup>8</sup> Secondo EMF (2012), l'economia circolare è "an industrial system that is restorative or regenerative by intention and design. It replaces the 'end-of-life' concept with restoration, shifts towards the use of renewable energy, eliminates the use of toxic chemicals, which impair reuse, and aims for the elimination of waste through the superior design of materials, products, systems, and, within this, business models." (EMF, 2012, p. 7)

<sup>9</sup> In realtà, Ghisellini *et al.* (2016) annoverano tra i "major drivers of performance improvement [...] the Government intervention [...] by means of heavy industry relocation, the introduction of regulations for polluting sectors and the highest availability of energy efficient technologies and equipment in the four eco-cities referred to above, compared to other Chinese cities" (Ghisellini *et al.* 2016, p. 23)



L'analisi di queste tre iniziative e la loro esclusione dal quadro teorico relativo alla circolarità completa la descrizione dell'approccio metodologico alla base delle prossime due sezioni.

#### 4. L'AMBIGUITÀ DEL RAPPORTO TRA CIRCOLARITÀ E FABBISOGNO ENERGETICO

Questa sezione si occupa del rapporto tra circolarità e fabbisogno energetico da un punto di vista teorico. A questo scopo, ipotizza un aumento della circolarità, che si ha quando si creano nuovi flussi circolari di materia e/o di energia o si potenziano quelli esistenti. Indipendentemente dalla natura delle strategie impiegate, è importante distinguerle sulla base del tipo di flussi generati. Da un lato, vi sono quelli per il mantenimento dell'energia, dall'altro quelli per la conservazione della materia. Si noti che, in quest'ultimo caso, gli effetti sul fabbisogno energetico presentano, chiaramente, natura solamente indiretta. Da un punto di vista economico, la circolarità può essere vista come un modo alternativo per produrre energia, da un lato, e materiali, componenti, e beni in generale dall'altro.

Il primo tipo di flussi rende disponibile una quantità di energia che, altrimenti (senza circolarità), ritornerebbe all'ambiente o perché incorporata in rifiuti materiali (solidi, liquidi, gassosi) o perché dissipata. In presenza di circolarità, la produzione totale è maggiore del fabbisogno (inteso come produzione da fonti vergini). Una parte dell'energia è infatti "prodotta" senza l'impiego di risorse naturali vergini<sup>10</sup>. La maggior disponibilità di energia, tuttavia, non comporta necessariamente una pari riduzione del fabbisogno energetico. La produzione di energia tramite circolarità rappresenta, infatti, un aumento dell'offerta di energia, che va comparata con la domanda. A meno che questa non sia perfettamente rigida o non subisca diminuzioni, il consumo tende ad aumentare (in virtù dell'effetto di rimbalzo). Questo aumento, d'altra parte, non sarà comunque maggiore della quantità di energia messa a disposizione tramite circolarità, eguagliando quest'ultima solo nel caso in cui la domanda sia infinitamente elastica (piatta). È quindi plausibile ritenere che una maggiore circolarità energetica comporti una diminuzione del fabbisogno.

Ancorché in modo indiretto, anche la circolarità della materia incide sul fabbisogno energetico. Escludendo infatti rare eccezioni, il mantenimento della materia all'interno dell'economia richiede energia. Pertanto, va confrontato

---

<sup>10</sup> Si ipotizza, chiaramente, che l'energia impiegata per la costituzione e il funzionamento dei circoli energetici interni sia inferiore a quella che questi circoli permettono di mantenere all'interno dell'economia, mettendola a disposizione della medesima.

il fabbisogno energetico di un determinato processo produttivo tradizionale (non circolare) con il corrispondente circolare. L'esito di questo confronto non è scontato. In molti casi, è favorevole all'opzione circolare (Gutowski *et al.*, 2013), in altri casi non lo è (Potting *et al.* 2017). Il fatto che il confronto sia favorevole all'opzione circolare, tuttavia, non è sufficiente per concludere a favore della medesima. Come nel caso dei circoli di energia, infatti, si deve tener conto dell'effetto di rimbalzo. Si immagini una situazione in cui il fabbisogno energetico della produzione circolare sia inferiore a quello della corrispondente tradizionale. Si faccia inoltre l'ipotesi (ottimistica) che l'output del processo circolare e quello del processo tradizionale siano perfettamente omogenei. Un aumento nell'offerta di questo prodotto provoca verosimilmente un aumento della domanda. Escludendo pure il caso di una domanda perfettamente elastica, la minor produzione non circolare va comunque confrontata con la maggior produzione circolare. A priori, non si può escludere che il bilancio complessivo veda un aumento del fabbisogno energetico<sup>11</sup>.

L'analisi appena condotta mostra che gli effetti della circolarità sul fabbisogno energetico possono essere abbastanza prevedibili per la circolarità energetica ma non altrettanto per la circolarità della materia. In generale, gli effetti della circolarità sul fabbisogno energetico non sono prevedibili a livello teorico. Al contrario, richiedono un'analisi accurata delle implicazioni della singola strategia, che tenga in considerazione le modalità specifiche (i progetti) attraverso le quali questa viene realizzata nella realtà. Per questa ragione, nel seguito di questa sezione spostiamo l'attenzione su alcune importanti strategie di circolarità.

Le strategie di circolarità energetica sono sostanzialmente di due tipi. L'uno prevede l'estrazione di energia dalla materia (cioè dai rifiuti)<sup>12</sup>. L'altro consiste nel recupero di energia attraverso sistemi a cascata. Questa modalità prevede una sequenza ordinata di utilizzatori, nella quale l'energia impiegata da quelli posti più a valle è fornita come residuo da quelli posti a monte. Per quanto riguarda l'estrazione di energia dai rifiuti, la letteratura in materia è estremamente vasta. Solo a partire dal 2000, Wang *et al.* (2016) individuano 4.348 studi, tra lavori relativi ai rifiuti solidi urbani e ai rifiuti industriali (Godinho *et al.* 2007). Dal punto di vista delle tecniche di estrazione dell'energia, le forme più frequenti sono la produzione di gas dalle discariche (Cherubini *et al.*, 2009), l'incenerimento di rifiuti solidi per la produzione di

---

<sup>11</sup> Si noti che qui ipotizziamo perfetta omogeneità tra prodotti ottenuti da processi non circolari e le corrispondenti controparti circolari.

<sup>12</sup> Il termine inglese è *energy recovery* che preferiamo tradurre con "estrazione" per distinguere questa strategia da quella del recupero di energia tramite processi a cascata.

energia elettrica o di energia termica, la digestione anaerobica, la gasificazione (Tan *et al.*, 2015) e la pirolisi (Al-Salem *et al.*, 2017; Sharuddin *et al.*, 2017). Sebbene l'estrazione di energia rappresenti senza dubbio una strategia di economia circolare, non si può tacere della gravità dei relativi effetti sull'ambiente e sulla salute umana, in particolare nel caso dell'incenerimento. Su questi effetti, la letteratura non solo è molto ricca, ma è molto aggiornata (si veda, ad esempio, Hahladakis *et al.*, 2018 come anche Psomopoulos *et al.* 2009 e Shim *et al.*, 2003) e conferma che “despite the evolution in technology, there are still concerns about incineration contaminating the environment and public health.”<sup>13</sup>

Il mantenimento dell'energia nel sistema economico attraverso il suo impiego a cascata ha notevoli potenzialità in considerazione della notevole quantità di energia termica che molti processi produttivi rilasciano. Una forma di energia particolarmente soggetta a spreco è, infatti, il calore. Per quanto riguarda l'utilizzazione di uno stesso flusso di energia da parte di una serie di attività collocate una a valle dell'altra, merita distinguere due ambiti di ricerca, a seconda della scala di analisi. Uno si riferisce a processi che hanno una scala non maggiore di quella del singolo stabilimento industriale. Come illustrato da Duflo *et al.* (2012), questo ambito include il livello del singolo macchinario, quello della linea produttiva (o sistema multi-macchinario) e, infine, quello dello stabilimento. L'altro, invece, guarda alle relazioni tra più unità produttive, che hanno la caratteristica di essere collocate in prossimità l'una delle altre. In questo caso, il concetto di riferimento è quello di simbiosi industriale, che trova realizzazione nei cosiddetti parchi eco-industriali. Da un punto di vista concettuale, i parchi industriali sono esempi di economia circolare. Come indicato da Prossman *et al.* (2017, 524), nei parchi industriali è possibile “creating [energy and] material circular flows” che permettono di trattenere energia e materia nell'economia. In questi contesti, l'energia viene utilizzata secondo uno schema a cascata. Per questo, alcuni autori (Ghisellini *et al.*, 2016: 20) chiamano questa strategia “energy cascading” mentre altri (ad esempio, Heshmati, 2015) usano l'espressione “energy conservation”<sup>14</sup>. Una delle più importanti modalità di mantenimento dell'energia riguarda l'utilizzo del calore (Lee *et al.* 1998, Li e Su 2012).

<sup>13</sup> Nonostante l'evidenza scientifica disponibile, la Commissione Europea include l'estrazione di energia da rifiuti tra gli elementi centrali della Direttiva Quadro sui rifiuti (EC, 2008).

<sup>14</sup> Un'altra definizione è quella di Chertow (2000), secondo cui la simbiosi industriale riguarda “traditionally separate industries in a collective approach to competitive advantage involving physical exchange of materials, energy, water, and/or by-products. The keys to industrial symbiosis are collaboration and the synergistic possibilities offered by geographic proximity” (Chertow, 2000: 314).

Le strategie per il mantenimento della materia nell'economia sono molto numerose e non sempre sono ben definite, come illustrato nella Sezione 2. Molte di queste sono ricomprese nelle liste proposte da Reike *et al.* (2018) e da Kalmykova *et al.* (2018). Il numero elevato di strategie, comunque, non rappresenta un ostacolo per questo lavoro, il cui obiettivo è illustrare l'ambiguità del rapporto tra circolarità e fabbisogno energetico. Allo scopo, infatti, è sufficiente concentrarsi su alcune di esse e mostrare l'ambiguità delle loro implicazioni sul fabbisogno energetico. Tra queste, il riciclaggio riveste sicuramente un ruolo molto importante (Haas *et al.*, 2015; Di Maio e Rem, 2015). In quest'area di ricerca, diversi lavori comparano il fabbisogno di un certo progetto di riciclaggio con la sua controparte non circolare. Va osservato, tuttavia, che questi studi si riferiscono a uno specifico materiale trattato con uno specifico processo. Un grado così elevato di specificità indica che i risultati di questi studi, per quanto rilevanti, non siano facilmente generalizzabili. Molto spesso, non si considera il problema della non perfetta sostituibilità tra l'output del processo non circolare e il corrispondente riciclato. Così, non si può escludere che la maggior produzione (ottenuta tramite circolarità), pur comportando una riduzione della produzione non circolare, non porti necessariamente a un risparmio energetico. La questione non è di poco conto se si considera, che alcuni processi di riciclaggio potrebbero essere, in realtà, a notevole intensità energetica (Allwood, 2014) mentre altri (quali ad esempio quello di alcune materie plastiche), potrebbero rivelarsi addirittura troppo costosi da un punto di vista energetico (Potting *et al.*, 2017; Hahladakis, 2018).

Mentre, nel caso del riciclaggio, esistono opzioni che consentono un risparmio energetico rispetto alle controparti non circolari, altre strategie non presentano un simile profilo di certezza. Tra queste, merita menzionare il ricondizionamento (o rimessa a nuovo – in inglese *refurbishing*) e il riuso. È vero che queste strategie sono caratterizzate da una intensità energetica ridotta, dato che non prevedono un completo smantellamento dei prodotti. Nel caso del riuso, per esempio, si può immaginare che l'unica energia necessaria sia quella per la realizzazione della transazione con cui l'oggetto passa dalla prima alla seconda mano. Una parte preponderante dell'energia impiegata per allestire il prodotto è conservata, come rilevano van Weelden *et al.* (2016) e Mugge *et al.* (2017), in modo da prolungare la vita utile dei beni (Downes *et al.*, 2011). Tuttavia, è importante osservare che queste strategie possono avere dei risvolti negativi nel caso in cui versioni più moderne risultino molto più efficienti da un punto di vista energetico dei prodotti rigenerati (OECD 2017). D'altra parte, secondo alcuni autori (Frey *et al.*, 2006; Güvendik, 2014; Kwak e Kim, 2016), che si sono occupati dei telefoni

mobili, il prolungamento del loro uso sarebbe benefico anche in presenza di miglioramenti importanti in termini di efficienza materiale ed energetica. Secondo le stime di Benton *et al.* (2015), un anno aggiuntivo di utilizzazione di uno smartphone può ridurre l'impronta totale in termini di anidride carbonica del 31%. Inoltre, sia il ricondizionamento che il riuso possono avere l'effetto di mettere a disposizione beni di un certo segmento (medio-alto) a una platea di consumatori più ampia che, altrimenti, non avrebbero potuto permetterseli (Potting *et al.*, 2017).

## 5. LA QUANTIFICAZIONE DEL RAPPORTO TRA CIRCOLARITÀ E FABBISOGNO ENERGETICO

Questa sezione presenta una breve rassegna di studi che analizzano progetti di circolarità. Nel loro insieme, questi lavori vanno considerati come una descrizione (chiaramente parziale) dell'evidenza empirica relativa a quanto affermato a livello teorico nella sezione 4. Vista questa corrispondenza, la struttura della presente sezione rispecchia quella della precedente. Prima si occupa di progetti di circolarità energetica, poi di quelli di circolarità della materia.

Per quanto riguarda i progetti di circolarità energetica, non è strettamente necessario quantificare gli effetti sul fabbisogno energetico giacché questi si possono considerare *comunque* positivi, per quanto osservato nella sezione precedente. Nel caso, invece, dei progetti per la conservazione della materia, è opportuno suddividere i lavori considerati in due gruppi. Il primo è costituito da quegli studi che operano un confronto quantitativo tra opzione circolare e opzione non-circolare, fornendo risultati anche relativamente agli effetti sul fabbisogno energetico. Il secondo gruppo di lavori o non presenta il confronto tra le due opzioni o non si occupa delle implicazioni energetiche. Entrambe le tipologie di studi hanno ragion d'essere nella nostra rassegna. Il primo gruppo indica, infatti, che esistono dei progetti di circolarità con implicazioni positive sul fabbisogno energetico, ma rivela anche che i risultati ottenuti si riferiscono ad un progetto particolare e quindi non sono generalizzabili. Inoltre, sono comunque parziali, mancando di considerare le interazioni tra il singolo progetto di circolarità e il resto dell'economia. Non tengono conto, infatti, degli effetti a livello sistemico che comprendono, ad esempio, l'effetto di rimbalzo. La ragion d'essere del secondo tipo di studi è, invece, mostrare che l'evidenza sugli effetti della circolarità sul fabbisogno energetico è, purtroppo, incompleta. Esistono, infatti, progetti di circolarità dei quali non si conoscono gli effetti energetici.

Coerentemente con la categorizzazione utilizzata nella sezione precedente, questa sottosezione si occupa, prima, delle strategie per l'estrazione di energia dai rifiuti, poi di quelle per il suo recupero in processi a cascata.

Nell'ambito della (vasta) letteratura sulla produzione di energia a partire da rifiuti, citiamo una serie di studi che, solitamente attraverso valutazioni del ciclo di vita (in inglese, life cycle assesment – LCA), quantificano gli effetti di questo tipo di progetti, guardando all'energia prodotta e (in alcuni casi) agli impatti ambientali. Beylot e Villeneuve (2013), ad esempio, analizzano 104 impianti d'incenerimento situati in Francia, presentando dati precisi che rivelano che ogni impianto ha la sua efficienza energetica e produce quantità diverse di energia (termica o elettrica). Mostrando che le prestazioni variano da impianto a impianto, si rivela ben poco informativo considerare un "impianto medio". Il contributo in termini di produzione di energia è, comunque, indiscutibile, qualunque sia il singolo caso considerato. Cucchiella *et al.* (2016) mostrano che, con una specifica configurazione dell'impianto di incenerimento, la trasformazione di rifiuti in energia è economicamente profittevole. Similmente, Trindade *et al.* (2018) trovano conseguenze positive, in termini di energia estratta, relativamente a un impianto di incenerimento in Brasile (nella città di Santo André nello stato di San Paolo) e a risultati analoghi giungono Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2017) per un impianto in Iran. Cherubini *et al.* (2009) confrontano quattro diversi metodi per il trattamento dei rifiuti solidi urbani nel comune di Roma. L'analisi proposta è molto accurata e, attraverso una metodologia che combina LCA con altri approcci, quali quello della contabilità dei flussi di materiali (in inglese, material flow analysis – MFA), non considera solo gli aspetti energetici ma anche un ampio spettro di impatti ambientali. Da un punto di vista energetico, il risultato forse più interessante è che l'incenerimento indistinto dei rifiuti permetterebbe di soddisfare approssimativamente il 15% del fabbisogno energetico della Città di Roma. La letteratura sull'estrazione di energia da rifiuti, in virtù della sua vastità, è anche molto specifica. Godinho *et al.* (2007), ad esempio, si occupano degli scarti delle lavorazioni di ceramica, che possono venir inceneriti, trattati attraverso pirolisi e gasificazione. Questi autori, non presentano, però, risultati quantitativi chiari relativamente agli effetti sul fabbisogno energetico.

L'idea di utilizzare un certo flusso di energia in sequenza (a cascata) in modo da minimizzare la dispersione è più recente rispetto a quella sull'estrazione da rifiuti e trova la sua motivazione nel dato calcolato dalla IEA (2012), secondo il quale le operazioni di riscaldamento e raffreddamento richiedono approssimativamente il 46% della domanda mondiale di energia. La sola di-

mensione di questo fabbisogno giustifica l'interesse scientifico e pratico per l'analisi delle potenzialità derivanti da una sua diminuzione. Nell'ambito della letteratura che studia le potenzialità entro una scala non superiore a quella del singolo stabilimento produttivo, merita attenzione il lavoro di Kurle *et al.* (2016). Oltre a presentare una breve ma utile rassegna di lavori che si concentrano o sul singolo stabilimento produttivo o su una sua sezione, propone un metodo per identificare e quantificare gli sprechi di energia termica nell'ambito di una linea produttiva di uno stabilimento del settore automobilistico. Il contributo di questo studio è una quantificazione dei vantaggi in termini di recupero di energia termica derivanti da una riorganizzazione della linea produttiva.

Per quanto riguarda i casi di simbiosi industriale, la letteratura è molto vasta e spesso viene fagocitata dalla letteratura sull'economia circolare che la annovera tra le sue origini. In questa prospettiva, si spiega il contributo di Winans *et al.* (2017) che presentano una rassegna relativa ai parchi industriali attualmente esistenti o in fase di progettazione a livello mondiale, riflettendo sulle ragioni che ne possono influenzare positivamente il loro successo. Scoprono che la consapevolezza relativamente ai benefici derivanti dalla condivisione di risorse (tra le quali, chiaramente, l'energia) è uno dei fattori di successo. Con motivazioni simili, Chertow (2007) fa notare che il posizionamento spaziale delle diverse imprese aderenti all'iniziativa di simbiosi industriale è fondamentale: "a critical point is that the spatial relationship, i.e. the distance between industries, influences energy and material flows between entities". Per contro, le criticità includono "lack of clear, standardized quantitative measurements and goals, data quality, shortage of advanced technology, poor enforcement of legislations, weak economic incentives, poor leadership and management and lack of public awareness". In questo quadro trova collocazione il lavoro di Geng *et al.* (2010) che sviluppano un sistema di indicatori per misurare l'efficienza energetica di un parco industriale.

Come ricordano Winans *et al.* (2017), "the first manifestation of industrial symbiosis, occurring for the first time in the 1960's in the eco-industrial park in Kalundborg, Denmark" (Jacobsen, 2006)<sup>15</sup>. Siccome la ragione fondamentale alla base della creazione dei parchi industriali è la convenienza economica (Ghisellini *et al.*, 2016), molti progetti riuniscono spesso imprese appartenenti ai settori ad elevata intensità di energia (tipicamente, siderurgia, chimica, plastica e carta). Esempi di iniziative di simbiosi industriale nel settore del ferro

---

<sup>15</sup> Diversi studi (Ehrenfeld e Gertler, 1997; Singhal e Kapur, 2002; Jacobsen, 2006; Heeres *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2013) quantificano (o stimano) i benefici effettivi o potenziali (Zheng *et al.*, 2013) derivanti dalla simbiosi tra imprese nel parco di Kalundborg in termini di risparmi di risorse (acqua, combustibili e prodotti chimici), di minori rifiuti ed emissioni.



e dell'acciaio sono quelli studiati da Johansson e Söderström per la Svezia o da Chertow (2007) per l'Australia<sup>16</sup>. Per quanto riguarda il settore della carta, Li e Ma (2015) studiano le potenzialità del parco industriale della carta del Guangdong Silver Island Lake, nel quale un'integrazione delle risorse a livello industriale potrebbe anche comportare una produzione più pulita. Nel settore chimico, Li *et al.* (2010) presentano il caso della produzione di ammoniaca, che viene inserita in un contesto di simbiosi industriale, assieme ad un processo di gassificazione del carbone e ad uno per la generazione di elettricità. Sulla base di uno studio di Zhang *et al.* (2006) il sistema nel suo complesso porterebbe ad un risparmio sul fabbisogno energetico del 9,1%.

Sebbene molti studi sui parchi industriali non presentino quantificazioni chiare dei vantaggi in termini di fabbisogno energetico, la loro stessa realizzazione può essere considerata un segnale sufficiente relativamente alla materializzazione di questi vantaggi. Tra i fattori da considerare va però ricordato che la costruzione di un parco industriale prevede una ri-localizzazione di impianti esistenti o la creazione di nuovi. Entrambe queste opzioni sembrano, però, lontane dal contesto industriale europeo che, se ri-localizzazione conosce, vede lo spostamento di attività industriali verso i paesi a bassi salari e con quadri normativi laschi. La domanda fondamentale riguarda, quindi, quale contributo possa dare in termini energetici un parco industriale.

#### STUDI RELATIVI ALLA CIRCOLARITÀ PER LA CONSERVAZIONE DI MATERIA

In questa sottosezione, ci occupiamo dei progetti di circolarità volti alla conservazione della materia. Le strategie che consideriamo si differenziano per livello di intensità energetica e includono il riciclaggio, il ricondizionamento, e il riuso. Tranne che in rare eccezioni, l'energia è un input necessario per qualunque progetto di circolarità. Nonostante questo, però, non tutti gli studi che analizzano i singoli progetti di circolarità considerano i loro effetti sul fabbisogno energetico, come osservato all'inizio di questa sezione.

Per quanto riguarda il RICICLAGGIO, di seguito presentiamo brevemente tre ambiti di ricerca. Il primo si concentra su quei settori che presentano un'intensità energetica particolarmente elevata. Secondo Gutowski *et al.* (2013), questi sono quelli dell'acciaio, del cemento, della carta, della plastica, e dell'alluminio. Proprio l'elevata intensità energetica di queste produzioni spiega l'interesse per lo studio delle potenzialità riservate dal riciclaggio di questi materiali.

---

<sup>16</sup> Per la Corea del Sud, si vedano Park *et al.* (2008), per il Giappone Van Berkel *et al.* (2009) e per la Cina Dong *et al.* (2013).



Gutowski *et al.* (2013) presentano evidenza fondata su diverse fonti, secondo la quale l'intensità energetica del processo di riciclaggio è notevolmente inferiore rispetto a quella della corrispondente produzione non circolare (da risorse vergini). Nel caso dell'alluminio, ad esempio, Grimaud *et al.* (2016) si occupano di un impianto di riciclaggio sito in Francia e ne studiano gli effetti ambientali. Dallo studio, non emerge, però, una chiara quantificazione del risparmio energetico che lo stabilimento comporta.

Il secondo ambito di ricerca, rilevante sia da un punto scientifico che per le applicazioni pratiche, è quello del riciclaggio dei componenti che contengono elementi rari. Un esempio a questo proposito è rappresentato dai magneti a base di neodimio-ferro-boro sinterizzato. Esistono diverse tecniche per la gestione di questi componenti al termine della loro (prima) vita utile. Tralasciando qui il riuso e il recupero della lega metallica o dell'elemento raro direttamente dai rifiuti (i cui vantaggi netti sono comunque analizzati in diversi autori), consideriamo il processo di riciclaggio dell'intero magnete. Jin *et al.* (2016) ne analizzano gli effetti energetici (oltretutto ambientali). Purtroppo, sebbene l'obiettivo del loro studio sia "a complete accounting for the energy and environmental costs associated with automated dismantling and recovery" non presentano quantificazioni esplicite relativamente al consumo energetico. Zakotnik *et al.* (2016) presentano alcuni risultati più dettagliati, che però, restano parziali.

Una terza area di interesse riguarda il riciclaggio di prodotti elettrici ed elettronici. La ragione principale per questa attenzione sta nella rapidità con cui crescono i volumi di rifiuti di questa tipologia, con gravi conseguenze ambientali. Andrae e Edler (2015), ad esempio, stimavano una produzione di 3,5 miliardi di dispositivi elettronici tra telefoni mobili, tablet, laptop, computer e schermi per il 2015. Così si spiega l'interesse da parte della letteratura per la gestione di componenti usati quali le batterie litio-ionio. Lo studio di Boyden *et al.* (2016) presenta un'analisi di diversi metodi per il loro riciclaggio (idrometallurgico, pirometallurgico) con il supporto di un LCA. Mancano tuttavia indicazioni precise relativamente agli impatti in termini di fabbisogno energetico. Gaines *et al.* (2011), per contro, si occupano di questo. I volumi di rifiuti spiegano l'interesse per aumentare la frazione di materiali da riciclare anche nel caso degli pneumatici, che rappresentano uno dei principali rifiuti nel settore automobilistico. In questo ambito, esistono studi quali quello di Landi *et al.* (2016) in cui si confrontano attraverso esercizi di LCA la discarica, l'incenerimento e il recupero di fibre per la produzione di materie plastiche o di asfalto. I risultati relativi agli effetti sul fabbisogno energetico tuttavia non emergono chiaramente.

Nel caso del RICONDIZIONAMENTO, gli impatti sul fabbisogno energetico sono dati più per acquisiti che dimostrati. Molto intuitivamente, si tratta di un pro-

cesso nel quale un'impresa raccoglie e restaura prodotti in modo da renderli nuovamente funzionanti per poi venderli (Rathore *et al.*, 2011). Per questo, si potrebbe essere portati a ritenere, come fanno ad esempio van Weelden *et al.* (2016) o Andrae (2016), che siccome si tratta di un processo a bassa intensità di energia che permette di conservare una porzione notevole del lavoro, dell'energia e dei materiali incorporati nell'articolo di consumo, il bilancio energetico sia sicuramente vantaggioso. Kamigaki *et al.* (2017), per esempio, si occupano del ricondizionamento di macchine fotocopiatrici in Giappone, sottolineando come l'adozione della logica del "prodotto come servizio" potrebbe aumentare il tasso di utilizzo delle apparecchiature, garantendo ai produttori risparmi anche in termini di energia. Presentano anche il risultato di una sostanziale riduzione delle emissioni di anidride carbonica (-80%) in confronto all'opzione non circolare, ma non forniscono quantificazioni precise relativamente ai vantaggi in termini di fabbisogno energetico. In più, non è nemmeno chiaro come giungano al risultato indicato. Nel caso del ricondizionamento di telefoni cellulari, l'evidenza dei benefici è abbastanza scarsa, come scarsa è la consapevolezza da parte dei consumatori a questo proposito (van Weelden *et al.*, 2016). Alcuni lavori (e.g. Mugge *et al.*, 2017) danno per acquisiti i benefici ambientali di scegliere un telefono ricondizionato rispetto a uno nuovo, ma non si occupano dei relativi aspetti energetici.

Il RIUSO è considerato simile al ricondizionamento per tipologia e origine dei vantaggi secondo WRAP (2011). Una definizione di riuso può essere ottenuta (con piccoli cambiamenti) dalla Direttiva quadro sui rifiuti come "any operation by which products or components [...] are used again for the same purpose for which they were conceived." Castellani *et al.* (2015) presentano un esercizio di tipo LCA relativamente a un negozio di seconda mano (gestito dall'associazione Mani Tese), in cui vengono venduti capi di abbigliamento, arredamento, oggettistica, articoli per la casa e il tempo libero. Secondo lo studio, il negozio contribuisce a ridurre diversi impatti e, in particolare, il consumo energetico annuale con un risparmio dell'ordine di sette terajoule equivalenti.

#### CONSIDERAZIONI GENERALI

A livello generale, l'analisi di questa sezione mostra che gli effetti della circolarità sul fabbisogno energetico possono essere positivi. Tuttavia, la loro evidenza è forzosamente limitata a singoli casi specifici. Inoltre, la loro quantificazione spesso manca, rendendo il quadro complessivo forzosamente incompleto. Nella letteratura sull'economia circolare, i riferimenti all'energia

sono pochi, come accennato nell'introduzione e, per questo, risulta necessario esplorare la letteratura relativa alle singole strategie di realizzazione della circolarità. È interessante notare che gli studi che forniscono stime accurate del risparmio energetico in seguito all'adozione di alcune di queste strategie spesso (come nel caso di Gutowski *et al.* 2013) nemmeno considerano la letteratura sull'economia circolare come riferimento scientifico.

Volendo provare a contestualizzare l'analisi di questa sezione in ambito italiano o europeo, le voci che potrebbero maggiormente contribuire alla riduzione del fabbisogno energetico sono di due tipi: l'estrazione di energia da rifiuti e la riorganizzazione industriale (o interna al singolo stabilimento produttivo o a livello di parchi industriali). La prima delle due comporta notevoli danni ambientali mentre la seconda, in considerazione dell'attuale panorama industriale italiano ed europeo sembra poco promettente. Rimangono, quindi, le iniziative di circolarità della materia i cui effetti, però, sono teoricamente ambigui ed empiricamente specifici o, addirittura, non noti.

## 6. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo capitolo è fornire una serie di riflessioni relative al rapporto tra economia circolare e fabbisogno energetico. Una prima ricognizione della letteratura rivela, da un lato, una mancanza di definizioni chiare di economia circolare, dall'altro una notevole confusione relativamente alle modalità per la sua realizzazione. Prima di considerare le conseguenze dell'economia circolare sul fabbisogno energetico, questo capitolo si occupa di affrontare due questioni fondamentali. La prima riguarda l'essenza dell'economia circolare, la seconda il metodo per l'analisi dei suoi effetti.

L'analisi critica della nozione di economia circolare evidenzia l'irrealizzabilità di flussi circolari chiusi, siano essi di materia o di energia. In altre parole, un sistema economico termodinamicamente isolato dall'ambiente (perché caratterizzato esclusivamente da flussi circolari interni), non può esistere. Naturalmente, è immaginabile che, all'interno dell'economia si sviluppi una serie di circoli che permettano il mantenimento (parziale) di energia e materia nell'economia. Sulla base di questa osservazione si giustifica il concetto di *circolarità di un'economia* come caratteristica che indica, appunto, la presenza di circoli interni al sistema economico. È chiaro che *economia circolare* e *circolarità* sono accomunate dal principio dell'esistenza di flussi circolari all'interno dell'economia. Al tempo stesso, però, si differenziano per due aspetti fondamentali. La nozione di circolarità, infatti, essendo fondata nel modello del bilancio dell'energia e dei materiali di Ayres e Kneese, appartiene

all'economia dell'ambiente e delle risorse naturali, mentre quella di economia circolare non ha radici ben chiare. Inoltre, la circolarità si definisce separatamente dal concetto di strategia.

La separazione tra circolarità (come caratteristica dell'economia) e strategie (intese come strumenti per la sua realizzazione) è intuitiva e cruciale al tempo stesso perché permette di vedere molto facilmente che studiare gli effetti della circolarità (o economia circolare) significa, in realtà, studiare gli effetti delle strategie usate per realizzarla. Nel caso del fabbisogno energetico, è molto utile raggruppare le diverse strategie in due categorie che comprendono, da un lato, quelle per il mantenimento dell'energia, dall'altro quelle per la conservazione della materia. L'implementazione delle prime comporta, verosimilmente, una diminuzione del fabbisogno energetico. Anche se il consumo aumenta (per l'effetto di rimbalzo) si può ritenere che questo aumento non sia maggiore della quantità di energia resa disponibile tramite circolarità. L'effetto delle seconde, invece, è ambiguo perché risulta dalla somma algebrica di due componenti di segno opposto. All'avvio dell'attività circolare, che, di norma, richiede energia, dovrebbe corrispondere la diminuzione di quella non circolare. Il bilancio complessivo, tuttavia, dipende dal caso particolare. L'analisi, quindi, dovrebbe contemplare non solo il confronto tra la specifica opzione circolare e la controparte non circolare ma anche le interazioni con il resto del sistema economico. Se il risparmio energetico legato alla riduzione dell'attività non circolare è inferiore al maggior impiego di energia da parte dell'opzione circolare, la circolarità comporta un *aumento* del fabbisogno. Per questo, sembra corretto concludere che gli effetti della circolarità sul fabbisogno energetico sono teoricamente ambigui.

L'ambiguità del rapporto tra circolarità e fabbisogno energetico è il risultato più importante di questo capitolo e la rassegna della letteratura empirica non permette, almeno per ora, una sua confutazione. La quantificazione degli effetti della circolarità sul fabbisogno energetico è circoscritta a un numero limitato di casi e, in molti studi, non viene nemmeno realizzata. Nell'ambito della circolarità per il mantenimento della materia, esistono progetti con effetti positivi sul fabbisogno, ma i risultati sono per forza limitati al caso specifico e non sono, almeno per ora, generalizzabili. Se i progetti di circolarità energetica, d'altro canto, possono essere considerati sicuramente favorevoli a una riduzione del fabbisogno, questo risultato va ponderato e contestualizzato al tempo stesso. Va ponderato perché le strategie di estrazione dell'energia da rifiuti continuano a presentare svantaggi importanti in termini di impatto ambientale, svantaggi non considerati in questo capitolo ma non per questo trascurabili. Va contestualizzato nell'attuale panorama industriale italiano ed europeo, visto che le strategie di recupero di energia tramite processi a casca-

ta presuppongono, quantomeno, una riorganizzazione industriale (all'interno della singola unità produttiva), se non addirittura una ri-localizzazione degli stabilimenti, tutte iniziative, queste, di non semplice realizzazione in un contesto industriale maturo come il nostro. In generale, le strategie apparentemente più promettenti in termini di riduzione del fabbisogno energetico si rivelano molto costose in termini non energetici.

Sulla base del lavoro di ricerca descritto in questo capitolo, le opportunità offerte dalla circolarità (o economia circolare) non sembrano molto chiare da un punto di vista teorico né immediatamente evidenti a livello della sua realizzazione pratica. Se si vuole fare dell'economia circolare un'occasione di riduzione del fabbisogno energetico, è necessario valutare gli effetti progetto per progetto, attraverso analisi che, come visto in questo capitolo, sono generalmente complesse e, di conseguenza, costose.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Al-Salem S.M., A. Antelava, A. Constantinou, G. Manos, A. Dutta (2017), *A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)*. «J. Environ. Management» 197, pp. 177-198.
- Allwood, J.M. (2014), “Squaring the circular economy: the role of recycling within a hierarchy of material management strategies”, in Worrell, E., Reuter, M. (Eds.), *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*, pp. 445-477.
- Andersen, M.S. (2007), *An introductory note on the environmental economics of the circular economy*. «Sustain. Sci.» 2, pp. 133-140.
- Andrae, A.S.G. (2016), *Life-cycle assessment of consumer electronics: a review of methodological approaches*. «IEEE Consum. Electron. Mag.» 5(1), pp. 51-60.
- Andrae A.S.G., T. Edler (2015), *On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030*. «Challenges» 6(1), pp. 117-157.
- Sharuddin A.S.D., F. Abnisa, W.M.A. Wan Daud, M.K. Aroua (2017), *Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste*. «Energy Convers. Manage.» 148, pp. 925-934.
- Ayres, R.U., A.V. Kneese (1969), *Production, consumption and externalities*. «American Economic Review» 59, pp. 282-297.
- Trindade, A.B., J.C. Escobar Palacio, A.M. González, D.J. Rúa Orozcob, E.E.S. Lora, M.L. Grillo Renó, O.A. del Olmo (2018), *Advanced exergy analysis and environmental assesment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery*. «Energy Convers. Manage.» 157, pp. 195-214.
- Benton D., E. Coats, J. Hazell (2015), *A Circular Economy for Smart Devices: Opportunities in the US, UK and India*. Green Alliance, London.
- Beylot, A., J. Villeneuve (2013), *Environmental impacts of residual Municipal Solid Waste incineration: A comparison of 110 French incinerators using a life cycle approach*. «Waste Management» 33, pp. 2781-2788.

- Boyden, A., V.K. Soo, M. Doolan (2016), *The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries*. *Procedia CIRP* 48, pp. 188-193.
- Brownell K.D., K.E. Warner (2009), *The perils of ignoring history: big tobacco played dirty and millions died. How similar is big food?* «*Milbank Quarterly*» 87, pp. 259-94.
- Castellani, V., S. Sala, N. Mirabella (2015), *Beyond the Throwaway Society: A Life Cycle-Based Assessment of the Environmental Benefit of Reuse*. «*Integrated Environmental Assessment and Management*» 11(3), pp. 373-382.
- Charonis, G.K. (2012), *Degrowth, steady state economics and the circular economy: three distinct yet increasingly converging alternative discourses to economic growth for achieving environmental sustainability and social equity*. World Economics Association (WEA) Conferences <http://sustainabilityconference2012.weaconferences.net/papers/degrowth-steady-state-economics-and-the-circular-economy-three-distinct-yet-increasingly-converging-alternative-discourses-to-economic-growth-for-achieving-environmental-sustainability-and-social-eq/>.
- Cherubini, F., S. Bargigli, S. Ulgiati (2009), *Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration*. «*Energy*» 34, pp. 2116-2123.
- Chertow, M. (2000), *Industrial Symbiosis, Literature and Taxonomy*. «*Annual Review of Energy and the Environment*» 25, pp. 313-337.
- Chertow, M. (2007), *Uncovering industrial symbiosis*. «*J Ind Ecol*» 11(1), pp. 11-30.
- Cucchiella, F., I. D'Adamo, M. Gastaldi (2017), *Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill*. «*Energy Conversion and Management*» 131, pp. 18-31.
- Cullen, J.M. (2017), *Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine?* «*J. Ind. Ecol.*» 21 (3).pp. 483-486.
- Daly, H.E. (1977), *The Steady-state Economy. The Sustainable Society: Implications for Limited Growth*. Praeger, New York and London, 107-114 ([www.amalthys.com/greenpath/019steadystate.html](http://www.amalthys.com/greenpath/019steadystate.html)).
- Di Maio, F., P.C. Rem (2015), *A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling*. «*Journal of Environmental Protection*» 6, pp. 1095-1104.
- Dong, L., H. Zhang, T. Fujita, S. Ohnishi, H. Li, M. Fujii, H. Dong (2013), *Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan*. «*J. Clean. Prod.*» 59, pp. 226-238.
- Dong L., F. Gu, T. Fujita, Y. Hayashi, J. Gao (2014), *Uncovering opportunity of low-carbon city promotion with industrial system innovation: case study on industrial symbiosis projects in China*. «*Energy Policy*» 65, pp. 388-97.
- Downes J., B. Thomas, C. Dunkerley, H. Walker (2011), *Longer Product Lifetimes. Chapter 2-Life Cycle of Nine Products*. Environmental Resource Management, London.

- Dufloy, J.R., J.W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, K. Kellens (2012), *Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 61, pp. 587-609.
- EC (2008), Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>.
- Ehrenfeld, J., N. Gertler (1997), *Industrial ecology in practice. The evolution of interdependence at Kalundborg*. «J. Ind. Ecol.» 1(1), pp. 67-79.
- EIB (2017), *The EIB in the circular economy*. [www.eib.org/attachments/thematic/circular\\_economy\\_en.pdf](http://www.eib.org/attachments/thematic/circular_economy_en.pdf).
- EMF (2012), *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. [www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf](http://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf).
- EMF (2014), *Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up Across Global Supply Chains*. [http://www3.weforum.or/docs/WEF\\_ENV\\_TowardsCircularEconomy\\_Report\\_2014.pdf](http://www3.weforum.or/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf).
- Enerdata (2017), *Global Energy Statistical Yearbook 2017*. [www.enerdata.net/publications/world-energy-statistics-supply-and-demand.html](http://www.enerdata.net/publications/world-energy-statistics-supply-and-demand.html).
- EUKN (2015), *The Circular City: Lessons from Europe*. [www.eukn.eu/fileadmin/Files/Policy\\_labs/2015\\_jun\\_18/Brief\\_factsheet\\_final\\_version.docx](http://www.eukn.eu/fileadmin/Files/Policy_labs/2015_jun_18/Brief_factsheet_final_version.docx).
- Frey, S.D., D.J. Harrison, E.H. Billett (2006), *Ecological footprint analysis applied to mobile phones*. «J. Ind. Ecol.» 10, pp. 199-216.
- Frosch, R.A. (1992), *Industrial ecology: a philosophical introduction*. «Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.» 89, pp. 800-803.
- Gaines L.L., J.L. Sullivan, A.J. Burnham, I. Belharouak (2011), *Life Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling*. Transportation Research Board 90th Annual Meeting, pp. 23-27.
- Geissdoerfer, M., P. Savaget, N.M.P. Bocken, E.J. Hultink (2017), *The circular economy – A new sustainability paradigm*. «J. Clean. Prod.» 143, pp. 757-768.
- Geng, Y., B. Doberstein (2008), *Developing the circular economy in China: challenges and opportunities for achieving “leapfrog development”*. «Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.» 15, pp. 231-239.
- Geng, Y., W. Xinbei, Z. Qinghua, Z. Hengxin (2010), *Regional initiatives on promoting cleaner production in China: a case of Liaoning*. «J. Clean. Prod.» 18, pp. 1502-1508.
- Georgescu-Roegen, N. (1971), *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge Mass. Harvard University Press.



- Ghisellini, P., C. Cialani, S. Ulgiati (2016), *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. «J. Clean. Prod.» 114, pp. 11-32.
- Godinho M., N. Marcilio, A. Vilela, L. Masotti, C. Martilins (2007), *Gasification and combustion of the footwear leather wastes*. « J. Am. Leather Chem. Assoc.» 1, pp. 23-39.
- Goldberg, T. (2017), *What about the circularity of hazardous materials?* «J. Ind. Ecol.» <http://doi.wiley.com/10.1111/jiec.12585>.
- Grimaud, G., N. Perry, B. Laratte (2016), *Life Cycle Assessment of Aluminium Recycling Process: Case of Shredder Cables*. «Procedia CIRP» 48, pp. 212-218.
- Gutowski, T.G., J.M. Allwood, C. Herrmann, S. Sahni (2013), *A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling*. «Annual Review of Environment and Resources» 38, pp. 81-106.
- Güvendik, M. (2014), *From smartphone to futurephone: assessing the environmental impacts of different circular economy scenarios of a smartphone using LCA*. MSc thesis Industrial Ecology, Delft University of Technology and Leiden University.
- Haas, W., F. Krausmann, D. Wiedenhofer M. Heinz (2015), *How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005*. «J. Ind. Ecol.» 19(5), pp. 765-777.
- Hahladakis, J.N., C. A. Velis, R. Weberb, E. Iacovidoua, P. Purnella (2018), *An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling*. «Journal of Hazardous Materials» 344, pp. 179-199.
- Heshmati, A. (2015), *A Review of the Circular Economy and its Implementation*. IZA Discussion Paper No. 9611.
- Heeres R.R., W.J. Vermeulen, F.B. De Walle (2004), *Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons*. «J Clean Prod» 12(8), pp. 985-95.
- Hobson, K. (2016), *Closing the loop or squaring the circle? Locating generative spaces for the circular economy*. «Prog. Hum. Geogr.» 40(1), pp. 88-104.
- IEA (2012), *Energy Technology Perspective 2012 – Pathways to Clean Energy Systems*. Paris.
- Jacobsen, N.B. (2006), *Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: a quantitative assessment of economic and environmental aspects*. «J. Ind. Ecol.» 10(1-2), 239-55.
- Jahiel, R.I. (2008), *Corporation-induced diseases, upstream epidemiologic surveillance, and urban health*. Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine 85, 517-31.
- Jin, H., P. Afiony, T. McIntyre, Y. Yih, J.W. Sutherland (2016), *Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling*. «Procedia CIRP» 48, pp. 45-50.

- Kamigaki, K., M. Matsumoto, Y.A. Fatimah (2017), *Remanufacturing and Refurbishing in Developed and Developing Countries in Asia – A Case Study in Photocopiers*. «Procedia CIRP» 61, pp. 645-650.
- Kalmykova, Y., M. Sadagopan, L. Rosado (2018), *Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools*. «Resources, Conservation & Recycling» 135, pp. 190-201.
- Kirchherr, J., D. Reike, M. Hekkert (2017), *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. «Resources, Conservation & Recycling» 127, pp. 221-232.
- Kneese, A.V., R.U. Ayres, R.C. d'Arge (1970), *Aspects of environmental economics: A materials balance-general equilibrium approach*. Johns Hopkins University Press, Baltimore MD.
- Kurle, D., C. Schulze, C. Herrmann, S. Thiede (2016), *Unlocking waste heat potentials in manufacturing*. «Procedia CIRP» 48, pp. 289-294.
- Kwak, M., H. Kim (2016), *Modeling the time-varying advantages of a remanufactured product: Is “reman” better than “brand new”?* «Journal of Mechanical Design», Transactions of the ASME, 138(5), [051701].
- Lacy, P., J. Rutqvist (2015), *Waste to Wealth. The circular economy advantage*. Accenture. Palgrave Macmillan.
- Lacy P., J. Keeble, R. McNamara, J. Rutqvist, T. Haglund, M. Cui, A. Cooper, C. Pettersson, E. Kevin, P. Buddemeier et al. (2014), *Circular Advantage: Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth*. Accenture: Chicago, IL, USA.
- Landi, D., S. Vitali, M. Germani (2016), *Environmental analysis of different end of life scenarios of tires textile fibers*. «Procedia CIRP» 48, pp. 508-513.
- Lee, Y.K, H.S. Park, R.W. Chang (1998), *The enhancement of energy utilizing efficiency by using low-temperature grade heat of the steel industry*. Presented at the 17th World energy congress held in Houston, Texas, USA.
- Li, Y., C. Ma (2015), *Circular economy of a papermaking park in China: a case study*. «Journal of Cleaner Production» 92, 65-74.
- Li, R.H., C.H. Su (2012), *Evaluation of the circular economy development level of Chinese chemical enterprises*. «Procedia Environmental Sciences» 13, pp. 1595-1601.
- Li H., W. Bao, C. Xiu, Y. Zhang, H. Xu (2010), *Energy conservation and circular economy in China's process industries*. «Energy» 35, pp. 4273-4281.
- Ma L.Q., J.B. Chen, X.H. Ma, Z.C. Zhao (2004), *Study on waste heat recovery for chlorine-alkali evaporation section by absorption heat pump*. «Chem Eng Design Commu»n 30(4), pp. 55-8.

- Meratizaman M., M. Amidpour, S.A. Jazayeri, K. Naghizadeh (2010), *Energy and exergy analyses of urban waste incineration cycle coupled with a cycle of changing LNG to pipeline gas*. «J Nat Gas Sci Eng» 2, pp. 217-21.
- MATTM (Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare) e MiSE (Ministero dello Sviluppo economico) (2017), *Verso un modello di economia circolare per l'Italia. Documento di inquadramento e di posizionamento strategico*. [http://consultazione-economiacircolare.minambiente.it/sites/default/files/verso-un-nuovo-modello-di-economia-circolare\\_HR.pdf](http://consultazione-economiacircolare.minambiente.it/sites/default/files/verso-un-nuovo-modello-di-economia-circolare_HR.pdf).
- Moreau, V., M. Sahakian, P. van Griethuysen, F. Vuille (2017), *Coming full circle: why social and institutional dimensions matter for the circular economy*. «J. Ind. Ecol.» 21(3), pp. 497-506.
- Mugge, R., B. Jockin, N. Bocken (2017), *How to sell refurbished smartphones? An investigation of different customer groups and appropriate incentives*. «Journal of Cleaner Production» 147, pp. 284-296.
- Nabavi-Pelesaraei, A., R. Bayat, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, H. Afrasyabi, K. Chau (2017), *Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management – A case study in Tehran Metropolis of Iran*. «Journal of Cleaner Production» 148, pp. 427-440.
- Niero, M., M.Z. Hauschild, S.B. Hoffmeyer, S.I. Olsen (2017), *Combining eco-efficiency and eco-Effectiveness for continuous loop beverage packaging systems: lessons from the Carlsberg circular community*. «J. Ind. Ecol.» 21 (3), pp. 742-753.
- OECD (2009), *Sustainable Manufacturing and Eco-innovation: Framework, Practices and Measurement*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.
- OECD (2017), *The macroeconomics of the circular economy transition: a critical review of modelling approaches*. Environment Directorate Environment Policy Committee. [www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPRPW/WPIIEP\(2017\)1/FINAL&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPRPW/WPIIEP(2017)1/FINAL&docLanguage=En).
- Pacheco E.B.A.V., L.M. Ronchetti, E. Masanet (2012), *An overview of plastic recycling in Rio de Janeiro*. «Resour. Conserv. Recycl.» 60, pp. 140-146.
- Park, H.S., E.R. Rene, S.M. Choi, A.S.F. Chiu (2008), *Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea from spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis*. «J. Environ. Manag.» 87, 1-13.
- Pearce, D.W., R.K. Turner (1989), *Economics of Natural Resources and the Environment*. Hemel Hempstead, Harvester Wheatsheaf, London.
- Pehnt M., J. Bödeker, M. Arens, F. Idrissova (2011), *Industrial Waste Heat – tapping into a neglected efficiency potential*. ECEEE 2011 Summer Study. Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society.

- Potting, J., M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer (2017), *Circular economy: measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Policy Report 2544.
- Prendeville S., C. Sanders, J. Sherry, F. Costa (2014), *Circular Economy: Is it Enough?* <http://www.edcw.org/sites/default/files/resources/Circular%20Economy-%20Is%20it%20enough.pdf>.
- Preston, F. (2012), *A Global Redesign? Shaping the Circular Economy*. Briefing Paper. [www.chathamhouse.org/sites/default/files/public/Research/Energy%20Environment%20and%20Development/bp0312\\_preston.pdf](http://www.chathamhouse.org/sites/default/files/public/Research/Energy%20Environment%20and%20Development/bp0312_preston.pdf).
- Prosman, E.J., B.V. Waehrens, G. Liotta (2017), *Closing global material loops: Initial insights into firm-level challenges*. «Journal of Industrial Ecology» 21(3), pp. 641-650.
- Psomopoulos C.S., A. Bourka, N.J. Themelis (2009), *Waste-to-energy: a review of the status and benefits in USA*. «Waste Manag» 29, pp. 1718-24.
- Rathore, P., S. Kota, A. Chakrabarti (2011), *Sustainability through remanufacturing in India: a case study on mobile handsets*. «Journal of Cleaner Production» 19(15), pp. 1709-1722.
- Reike, D., W.J.V. Vermeulen, S. Witjes (2017), *The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options*. Resources, Conservation & Recycling.
- Schut, E., M. Crielaard, M. Mesman (2015), *Circular Economy in the Dutch Construction Sector: A Perspective for the Market and Government*. [www.rivm.nl/dsresource?objectid=806b288e-3ae9-47f1-a28f-7c208f884b36&type=org&disposition=inline](http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=806b288e-3ae9-47f1-a28f-7c208f884b36&type=org&disposition=inline).
- Sharuddin, S.D.A., F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, M.K. Aroua (2017), *Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste*. «Energy Conversion and Management» 148, 925-934.
- Shim Y.S., Y.K. Kim, S.H. Kong, S.W. Rhee, W.K. Lee (2003), *The adsorption characteristics of heavy metals by various particle sizes of MSWI bottom ash*. «Waste Manag.» 23(9), 851-857.
- Singhal, S., A. Kapur (2002), *Industrial estate planning and management in Indianan integrated approach towards industrial ecology*. «J. Environ. Manag.» 66, 19-22.
- Skene, K.R. (2017), *Circles, spirals, pyramids and cubes: why the circular economy cannot work*. «Sustainability Sci.» 1-14.
- Sokka L., S. Pakarinen, M. Melanen (2011), *Industrial symbiosis contributing to more sustainable energy use an example from the forest industry in Kymenlaakso, Finland*. «J. Clean. Prod.» 19, pp. 285-293.
- Solheimslid T., H.K. Harneshaug, N. Lømmen (2015), *Calculation of first-law and second-law efficiency of a Norwegian combined heat and power facility driven*

- by municipal waste incineration – A case study. «Energy Convers Manag» 95, pp. 149-59.
- Su, B., A. Heshmati, Y. Geng, X. Yu (2013), *A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation*. «Journal of Cleaner Production» 42, pp. 215-227.
- Tan S.T., W.S. Ho, H. Hashim, C.T. Lee, M.R. Taib, C.S. Ho (2015), *Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia*. «Energy Convers Manag» 102, pp. 111-20.
- van Beers D., W.K. Biswas (2008), *A regional synergy approach to energy recovery: the case of the Kwinana industrial area, Western Australia*. «Energy Convers. Manag.» 49, 3051-3062.
- van Berkel, R., T. Fujita, H. Shisuka, M. Fujii (2009), *Quantitative assessment of urban and industrial symbiosis in Kawasaki*, «Japan. Environ. Sci. Technol.» 43, pp. 1271-1281.
- van Weelden, E., R. Mugge, C. Bakker (2016), *Paving the way towards circular consumption: exploring consumer acceptance of refurbished mobile phones in the Dutch market*. «J. Clean. Prod.» 113, pp. 743-754.
- Wang, Y., N. Lai, J. Zuo, G. Chen, H. Du (2016) *Characteristics and trends of research on waste-to-energy incineration: a bibliometric analysis, 1999-2015*. «Renew Sustain Energy Rev» 66, pp. 95-104.
- Wiist, W.H. (2010), *The corporation: an overview of what it is, its tactics, and what public health can do*. In Wiist W.H., editor. *The Bottom line or public health: tactics corporations use to influence health and health policy, and what we can do to counter them*. New York: Oxford University Press, pp. 3-72.
- Winans, K., A. Kendall, H. Deng (2017), *The history and current applications of the circular economy concept*. «Renewable and Sustainable Energy Reviews» 68, pp. 825-833.
- WRAP (2011), *A methodology for quantifying the environmental and economic impacts of reuse*. [www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Final%20Reuse%20Method.pdf](http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Final%20Reuse%20Method.pdf).
- Yuan, Z., J. Bi, Y. Moriguchi (2006), *The circular economy; a new development strategy in China*. «J. Ind. Ecol.» 10, pp. 4-8.
- Zakotnik M., C.O. Tudor, L.T. Peiró, P. Afiuny, R. Skomski, G.P Hatch (2016), *Analysis of energy usage in Nd-Fe-B magnet to magnet recycling*, «Environmental Technology & Innovation» 5, 117-126.
- Zhang X.R., L. Gao, H.G. Jin, R.X. Cai (2006), *Design and analysis of coal based ammonia power polygeneration*. «Chin J Power Eng» 26 (2), pp. 289-94.

- Zheng, H., Y. Zhang, Z. Yang, G. Liu, M. Su, B. Chen, X. Meng, Y. Li (2013), *Exploring improvement paths for eight industrial symbiosis complexes throughout the world.* «J. Environ. Account. Manag.» 1(3), pp. 295-306.
- Zhu, D., S. Qiu (2007), *Analytical tool for urban circular economy planning and its preliminary application: a case of Shanghai.* «Urban Ecological Planning» 31(3), pp. 64-70.
- Zoboli, R. (2018), *L'economia Circolare per riusare anche i saperi?*, in L. Paolazzi, L., Gargiulo, T. & Sylos Labini, M. (Eds.), *Le sostenibili carte dell'Italia* (139-166). Venezia: Marsilio Editori.