

Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Scienze Statistiche  
Corso di Laurea Triennale in  
Statistica e Gestione delle Imprese



RELAZIONE FINALE

**DIFFUSIONE CON POTENZIALE VARIABILE: ANALISI  
STATISTICA DEI CONSUMI DI ENERGIA NUCLEARE  
PER STATI UNITI, FRANCIA E GERMANIA**

Relatore: Prof. Mariangela Guidolin  
Dipartimento di Scienze Statistiche

Laureando: Marco Guerra  
Matricola: 1008559

Anno Accademico 2013/2014



# Indice

Introduzione.....	5
1. Diffusione delle innovazioni: il modello di Bass e le sue estensioni.....	7
1.1 Il modello di Bass standard.....	8
1.1.1 Soluzione del modello di Bass.....	11
1.2 Il modello di Bass generalizzato.....	13
1.2.1 Impulsi esponenziali.....	14
1.3 Il modello di Guseo-Guidolin.....	15
2. Stima dei modelli di Bass e di Guseo-Guidolin.....	19
2.1 La regressione non lineare.....	19
2.2 Metodi di stima.....	21
2.2.1 L'algoritmo di Gauss-Newton.....	21
2.2.2 L'algoritmo di Levenberg-Marquardt .....	22
2.3 Analisi dei residui.....	22
2.3.1 I processi stocastici.....	23
2.3.2 Processo rumore bianco (white noise).....	25
2.3.3 Processo a media mobile $MA(q)$ .....	25
2.3.4 Processo autoregressivo $AR(p)$ .....	26
2.3.5 Processo autoregressivo a media mobile $ARMA(p, q)$ .....	26
2.3.6 Il test di Durbin-Watson.....	27

3. L'energia nucleare.....	29
3.1 Cenni storici.....	29
3.2 Funzionamento di una centrale elettronucleare.....	31
3.3 Gli incidenti nucleari della storia.....	32
3.3.1 Incidente di Three Mile Island.....	33
3.3.2 Disastro di Černobyl'.....	34
3.3.3 Disastro di Fukushima Dai-Ichi.....	36
3.4 Produzione e consumo di energia nucleare.....	38
3.4.1 USA.....	38
3.4.2 Francia.....	39
3.4.3 Germania.....	40
4. Analisi statistica dei consumi di energia nucleare in USA, Francia e Germania.....	43
4.1 Il caso statunitense.....	45
4.2 Il caso francese.....	55
4.3 Il caso tedesco.....	61
Conclusioni.....	67
Bibliografia.....	69
Sitografia.....	70

# Introduzione

Nel seguente lavoro saranno studiate le dinamiche di consumo nazionale di energia nucleare in tre dei maggiori utilizzatori di tale fonte a livello mondiale: Stati Uniti, Francia e Germania. L'interesse di tale analisi è principalmente rivolto alla possibilità di realizzare previsioni sulle prospettive future del nucleare nel mondo, specie in seguito all'incidente di Fukushima (marzo 2011), che ha indotto molti paesi a rivedere la propria politica energetica. A tale scopo, saranno oggetto di analisi le serie storiche relative ai consumi di energia nucleare, dal 1965 al 2012, mediante idonee strutture matematico-statistiche, in grado di descrivere l'evoluzione nel tempo dell'utilizzo del nucleare nei tre Paesi scelti. I modelli utilizzati appartengono alla classe dei modelli di diffusione e nello specifico si procederà all'applicazione di un modello con mercato potenziale variabile, che consente di identificare il ruolo della comunicazione in un processo di diffusione, aspetto che appare di grande importanza anche nel caso del nucleare. Attraverso l'utilizzo del modello a potenziale dinamico, che rappresenta un'estensione del modello di Bass, si otterrà quindi una previsione sul futuro declino del nucleare, cosa che di primo acchito potrebbe essere interpretata come l'effetto dei cambiamenti di programma messi in atto dai vari governi dopo che l'incidente nipponico ha riportato l'attenzione sui rischi derivanti dall'energia atomica. Dai risultati ottenuti, emergerà in effetti che l'incidente del 2011 può essere ritenuto solo parzialmente la causa di tale declino, che va invece ricercata in altre dinamiche correlate.

La relazione è suddivisa in quattro capitoli.

Nel primo capitolo viene descritta la classe dei modelli di Bass, che sono particolarmente adatti a rappresentare i processi di diffusione delle innovazioni. Un'attenzione particolare è dedicata alla descrizione di un modello con potenziale variabile, che generalizza la struttura del modello di Bass standard. Nel secondo capitolo vengono presentati i principali metodi utilizzati per la stima di tali modelli, basati su tecniche di regressione non lineare nei parametri e relativi algoritmi di stima. In seguito viene proposta una breve rassegna dei più importanti processi stocastici per l'analisi delle serie storiche, che si riveleranno utili in fase di analisi dei residui. Nel terzo capitolo verrà trattata la parte "teorica" relativa all'energia nucleare, dapprima con un excursus storico, per poi illustrare i consumi nucleari nei Paesi di riferimento. Il quarto capitolo è invece riservato alle analisi statistiche derivanti dall'applicazione dei modelli presentati in precedenza. Seguono alcuni commenti conclusivi.



# 1. Diffusione delle innovazioni: il modello di Bass e le sue estensioni

La diffusione di un'innovazione in un mercato o in un sistema sociale è diventata negli ultimi quattro decenni un tema di notevole interesse.

Con il termine innovazione si definisce “un'idea, una pratica o un progetto che è percepito come nuovo da un individuo o da un'altra unità di adozione” (Rogers, 2003). Pertanto non è detto che un prodotto debba essere stato creato di recente per essere un'innovazione: se gli individui lo percepiscono come nuovo, sarà per essi un'innovazione indipendentemente dal tempo che è trascorso dalla sua invenzione. La diffusione di un'innovazione invece indica “un processo sociale che coinvolge relazioni di comunicazione interpersonale” (Rogers, 2003). È perciò il meccanismo attraverso cui un'innovazione viene conosciuta nel tempo dai membri di un sistema sociale, che interagiscono tra loro scambiandosi informazioni.

La modellazione e la previsione della diffusione di un'innovazione sono tematiche molto discusse nei testi scientifici e presentano un'utilità in molteplici discipline, come per esempio la sociologia, il marketing, la biologia, l'epidemiologia e la statistica.

Nell'ambito del marketing, la conoscenza preventiva delle dimensioni qualitative e quantitative dei processi diffusivi di nuovi prodotti permette di utilizzare opportune strategie, che vengono scelte sulla base della velocità di penetrazione del prodotto nel mercato, dell'ampiezza dei gruppi di possibili adottanti raggiungibili e del mercato stesso.

I modelli di diffusione permettono di rappresentare il processo di adozione di un'innovazione e di stimarne il possibile andamento futuro in maniera tempestiva. Si fa riferimento a questa particolare categoria di modelli poiché i processi di adozione presentano un ciclo di vita (si parla appunto in marketing di *ciclo di vita del prodotto*) relativamente breve, con segni evidenti di non stazionarietà dovuti a meccanismi di inizializzazione nella fase di lancio del prodotto e a vincoli di saturazione nella fase finale del ciclo. Le adozioni di un bene si sviluppano, come accade per i cicli biologici, in quattro fasi distinte: introduzione, crescita, maturità e declino.

Per quanto riguarda la modellazione statistica, il ciclo di vita del prodotto è a tutti gli effetti un caso molto particolare di serie storica, in quanto i dati sono ordinati cronologicamente: tuttavia, la modellazione di tali serie mediante una funzione di tipo polinomiale indicizzata in  $t$  (tempo) si rivela spesso una scelta inadeguata per il

fenomeno di interesse, perché non si tratta di serie che possono essere rese stazionarie mediante differenziazioni.

Nelle seguenti sezioni saranno introdotti alcuni modelli di diffusione particolarmente noti nel marketing quantitativo, quali il modello di Bass standard e due generalizzazioni di questo: il modello di Bass generalizzato e il modello di Guseo-Guidolin: essi ci permetteranno di operare un'analisi statistica approfondita delle serie storiche dei consumi di energia nucleare in Francia, Stati Uniti e Germania.

## 1.1 Il modello di Bass standard

Il modello di Bass (Bass, 1969) descrive il ciclo di vita di un prodotto nelle sue caratteristiche fasi di introduzione, crescita, maturità e declino. Sebbene fosse in un primo momento solamente destinato alla comprensione e previsione degli andamenti di vendita di beni di consumo durevoli, esso si è nel tempo dimostrato ben adattabile ad una classe più ampia di prodotti e servizi, che spaziano dalle telecomunicazioni ai medicinali, passando per vari tipi di tecnologie.

Tale modello descrive il processo di acquisto di una particolare innovazione da parte di un set di potenziali adottanti per predire l'andamento nel mercato del nuovo prodotto. Il processo di adozione è stato descritto dall'economista Rogers mediante una distribuzione normale, mentre gli acquirenti sono stati suddivisi in cinque gruppi distinti, sulla base del tempo in cui decidono di adottare. Si riconoscono perciò, in ordine decrescente di rapidità, gli innovatori, gli adottanti iniziali, la maggioranza precoce, la maggioranza ritardataria e i veri e propri ritardatari.



Figura 1.1 - Le cinque classi che adottano un'innovazione



Il modello di Bass propone una semplificazione delle tipologie di adottanti, che si riducono a due: da una parte gli *innovatori* e dall'altra gli *imitatori*, che possono essere considerati come il raggruppamento delle quattro classi che acquisiscono il prodotto

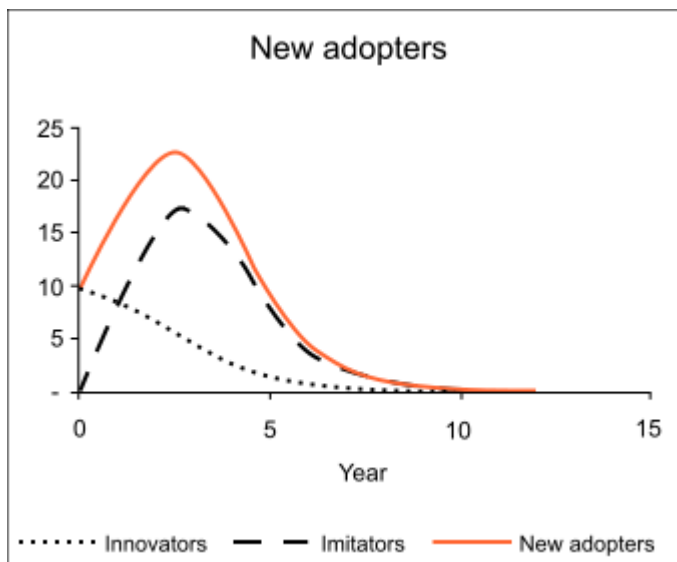


Figura 1.2 - Le due classi di adottanti nel modello di Bass

più lentamente.

La distinzione dei due gruppi è data essenzialmente dalla tipologia di informazione da cui sono stati influenzati nella scelta di adozione. Gli innovatori, infatti, sono condizionati da fattori informativi esterni, come possono essere i mass media oppure la comunicazione istituzionale, mentre gli imitatori sono influenzati da un fattore che è interno, il cosiddetto passaparola (*word-of-mouth*).

Il gruppo di pionieri, che rappresenta solitamente il 2,5% circa del totale degli adottanti, non viene quindi esposto alle pressioni degli altri membri del sistema sociale, cosa che invece avviene agli imitatori. Il processo di diffusione viene perciò iniziato dagli innovatori, che adottano per primi il nuovo prodotto, mentre i restanti attori entrano in gioco solo in un secondo momento. A conferma di questo, come si può evincere dalla Figura 1.2, la componente innovativa è predominante in un primo momento, ma vede ridotto il suo effetto molto rapidamente, a causa della crescita veloce che caratterizza la parte imitativa del processo, soggetta anch'essa però ad un vincolo di saturazione nelle fasi terminali del ciclo. Il modello di Bass può essere formalizzato attraverso un'equazione differenziale di primo ordine:

$$z'(t) = \left( p + q \frac{z(t)}{m} \right) (m - z(t)) \quad (1.1)$$

che può essere riscritta in questo modo:

$$z'(t) = p(m - z(t)) + q \frac{z(t)}{m} (m - z(t)). \quad (1.2)$$

Queste due formulazioni fanno capire come le adozioni avvenute all'istante  $t$ , ovvero  $z'(t)$ , siano direttamente proporzionali al mercato residuo  $(m - z(t))$ , dove  $z(t)$

rappresenta il numero di adozioni cumulate fino al tempo  $t$ , mentre  $m$  indica il mercato potenziale, ovvero il livello massimo di adozioni che può essere raggiunto nel ciclo di vita di un bene. Il mercato potenziale, nel caso del modello di Bass, è da considerarsi costante lungo tutto il processo diffusivo. I parametri  $p$  e  $q$  sono, rispettivamente, i parametri di innovazione e di imitazione. Il secondo dei due è mediato dal termine  $\frac{z(t)}{m}$ , che indica la pressione (crescente al crescere di  $t$ ) che viene esercitata sugli imitatori da coloro che hanno adottato precedentemente. Appare evidente come tale frazione risulti pari a zero al tempo  $t = 0$  e ciò implica la sola presenza degli innovatori nel primo passo del processo. La coesistenza di entrambe le componenti inizia già dal momento successivo e, come è già stato detto precedentemente, la parte innovativa assume un ruolo sempre più marginale con l'aumentare delle adozioni cumulate.

L'equazione (1.2) mette in risalto una separazione tra i due coefficienti. Questa distinzione così netta può essere spiegata dal fatto che il modello di Bass deriva dalla somma di due sottomodelli: il modello monomolecolare (Fourt e Woodlock, 1960) per la componente innovativa e il modello logistico di Verhulst (1838) per quella imitativa.

Se si esprime il termine  $\frac{z(t)}{m}$  come  $y(t)$  è possibile riscrivere il modello di Bass come segue:

$$y'(t) = (p + qy(t))(1 - y(t)), \quad (1.3)$$

dove con  $y'(t)$  si intende la proporzione di adottanti all'istante  $t$ , mentre  $y(t)$ , che esprime la probabilità che l'evento si sia verificato non oltre  $t$ , è una funzione di ripartizione. Operando uno spostamento dei termini dell'equazione (1.3) si giunge all'espressione:

$$\frac{y'(t)}{1 - y(t)} = p + qy(t). \quad (1.4)$$

Il modello di Bass è quindi interpretabile come un *hazard rate*, ovvero come la probabilità che un evento avvenga dato che non si è ancora verificato. Nella formulazione descritta, infatti, la probabilità di adozione da parte di un individuo al tempo  $t$  è condizionata dal fatto che egli non abbia ancora acquistato il bene ed è derivata dalla combinazione di due effetti che risultano indipendenti tra loro: le componenti innovativa e imitativa all'interno del processo sono ben distinte, segno che

ogni potenziale adottante non può essere condizionato nella decisione di acquisto sia da influenze interne sia esterne all'ambiente sociale, ma solo da una delle due.

### 1.1.1 Soluzione del modello di Bass

La formula (1.3) può anche essere riscritta nel seguente modo:

$$y'(t) + qy(t)^2 + (p - q)y(t) - p = 0. \quad (1.5)$$

La (1.5) ci permette di capire che si sta trattando un caso particolare dell'equazione di Riccati a coefficienti costanti (si veda per completezza Guseo, 2004). Nel modello di Bass, le soluzioni  $r_1$  e  $r_2$  dell'equazione caratteristica di secondo grado

$ax^2 + bx + c = 0$ , ricavate tramite la nota formula  $r_i = -\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$  (per  $i=1,2$ ), sono  $r_1 = -\frac{p}{q}$  e  $r_2 = 1$ .

Poiché, nelle applicazioni più tipiche del modello,  $(1 - y)$  e  $y'$  sono termini positivi e lo sono anche i parametri  $p$  e  $q$ , si ottiene che  $r_1 < 0 < r_2$ .

La soluzione passante per l'origine, quindi tale per cui  $y(0) = 0$ , ha come asintoti orizzontali proprio le due radici  $-\frac{p}{q}$  e 1 ed è una funzione monotona crescente. La soluzione del modello di Bass, ottenibile in forma chiusa, permette di calcolare la proporzione cumulata di adottanti e viene qui riportata:

$$y(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}}. \quad (1.6)$$

Può essere preferibile trattare la soluzione in termini assoluti, quindi calcolando il numero cumulato di adottanti al tempo  $t$ , ovvero  $z(t)$ , che si otterrà moltiplicando  $y(t)$  per il parametro  $m$ , che descrive il mercato potenziale. Si ottiene:

$$z(t) = m \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}}. \quad (1.7)$$

Si noti come il controllo dell'asintoto superiore è dovuto alla dimensione di  $m$ , il mercato potenziale, in quanto  $\lim_{t \rightarrow +\infty} z(t) = mr_2$ , dove  $r_2 = 1$ .

La versione cumulata del modello di Bass ha una forma ad S. Esistono molte tipologie di curve che presentano lo stesso andamento e sono tutte usate per descrivere e

prevedere molteplici fenomeni di crescita. A differenza di altri modelli ad esso analoghi, il modello di Bass ha in diversi contesti l'obiettivo la conoscenza della probabilità condizionata di acquisto in un dato istante temporale, piuttosto che la distribuzione cumulata di vendita. L'attenzione è quindi posta sull'adozione istantanea e sul raggiungimento di un picco, momento di massima crescita del processo di diffusione, che è seguito da una fase di declino: questi sono nella maggior parte dei casi il principale motivo di interesse. Per ottenere le adozioni istantanee, si calcola la derivata prima della quantità illustrata in (1.6) rispetto al tempo:

$$y'(t) = \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+q e^{-(p+q)t})^2} \quad (1.8)$$

oppure, se è preferibile trattare con dati assoluti, si trova in maniera analoga la densità

$$z'(t) = m \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+q e^{-(p+q)t})^2}. \quad (1.9)$$

Attraverso il modello di Bass è possibile prevedere anche l'istante in cui si registrerà il picco massimo di adozioni, dato da

$$t^* = \frac{\ln(q/p)}{p+q} \quad (1.10)$$

e in quel momento la funzione di ripartizione  $z(t)$  assume valore

$$z(t^*) = m \left( \frac{1}{2} - \frac{p}{2q} \right). \quad (1.11)$$

Poiché il parametro  $p$  ha un valore solitamente molto inferiore a  $q$ , si può affermare che le vendite cumulate fino al picco sono approssimativamente pari a  $m/2$ , cosa che si poteva intuire già dalla forma simmetrica delle previsioni di vendita attorno al massimo. Il modello di Bass presenta diversi punti di forza, ma altri di debolezza. Tra i suoi pregi vanta la semplicità, che lo rende facilmente interpretabile, la parsimonia, essendo caratterizzato solamente da tre parametri, e il fatto di necessitare per le stime dei soli dati cumulati di vendita. Lo stesso modello però ha dei grossi svantaggi, in quanto presuppone la costanza del mercato potenziale lungo tutto il processo di adozione, non tiene conto dell'effetto di variabili esogene che possono modificare la velocità della diffusione ed è pensato solamente per prodotti che hanno un ciclo di vita finito o

perlomeno limitato. Negli anni successivi sono state sviluppate delle estensioni al modello di Bass standard, che hanno cercato di ovviare ai problemi che esso presentava: è il caso, per esempio, dei modelli di Bass generalizzato e di Guseo-Guidolin (2009).

## 1.2 Il modello di Bass generalizzato

Una delle maggiori pecche del modello di Bass, come è stato accennato al paragrafo precedente, risiede nel non tenere conto dell'effetto che delle variabili esogene possono avere sul ciclo di vita del prodotto. Si tratta, per esempio, di fattori come le strategie di marketing mix (prezzo e pubblicità per citarne alcune), i sistemi di incentivo, gli interventi politici o anche le perturbazioni dell'ambiente.

Nel 1994 Bass, Krishnan e Jain formularono un nuovo modello, conosciuto come modello di Bass generalizzato, che migliora la versione precedente. Esso è nato infatti per considerare all'interno del processo diffusivo anche tutte quelle variabili esterne che con il modello di Bass standard non venivano rilevate.

Nel modello più recente è stata introdotta una funzione di intervento  $x(t)$ , che sottolinea l'influenza di un fattore esogeno e consente di modificare la velocità di diffusione. Tale funzione deve essere integrabile in domini limitati e non negativa. L'equazione del GBM è molto simile a quella del Bass standard:

$$z'(t) = m \left( p + q \frac{z(t)}{m} \right) (m - z(t)) x(t) \quad (1.12)$$

la quale, partendo sempre dall'ipotesi che  $z(0) = 0$ , ha soluzione in forma chiusa pari a

$$z(t) = m \frac{1 - e^{-(p+q) \int_0^t x(\tau) d\tau}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q) \int_0^t x(\tau) d\tau}}. \quad (1.13)$$

La funzione  $x(t)$  ha quindi un ruolo determinante nel processo di adozione e osservando la (1.13) è possibile fare alcune considerazioni. Se la variabile esogena risulta pari a 1, cosa che implica l'assenza di modificazioni strategiche nel marketing, il modello di Bass generalizzato si riduce al più semplice Bass standard e ciò avviene anche nel caso in cui essa risulti costante in un dato arco di tempo. Se invece  $x(t)$  è compresa tra 0 e 1, si verifica un rallentamento nella diffusione, mentre se essa

assume un valore superiore all'unità, si assiste ad una contrazione dei tempi di adozione e ad una conseguente accelerazione del processo. Quindi la funzione "portante" sopra descritta consente di modificare la velocità di scorrimento del tempo, anticipando o posticipando le adozioni, ma senza cambiare la dimensione del mercato potenziale  $m$ , considerato ancora fisso, oppure le componenti  $p$  e  $q$ .

Sebbene si tratti di una funzione espressa in termini generali, poiché capace di descrivere molteplici casi di interventi esogeni, ne esistono alcune semplici varianti che permettono di modellare varie tipologie di perturbazione. Si possono utilizzare per esempio degli shock esponenziali, adatti per descrivere perturbazioni intense e rapide, o rettangolari, che individuano un effetto stabile che dura per un tempo abbastanza lungo, oppure ancora misti, dati dalla composizione dei due impulsi precedenti.

Allo scopo dell'analisi successiva, verrà trattata nel prossimo paragrafo solamente la prima tipologia tra gli shock precedentemente citati.

### 1.2.1 Impulsi esponenziali

In determinate situazioni la costanza della funzione d'intervento  $x(t)$  può essere alterata da impulsi istantanei molto intensi, seguiti da un riassorbimento, più o meno rapido, che riporta alla condizione di stazionarietà. Tali perturbazioni possono essere definite come degli "shock esponenziali" (Guseo, 2004). Nel caso particolare di tre impulsi di questo tipo si avrà:

$$x(t) = 1 + c_1 e^{b_1(t-a_1)} I_{t \geq a_1} + c_2 e^{b_2(t-a_2)} I_{t \geq a_2} + c_3 e^{b_3(t-a_3)} I_{t \geq a_3} \quad (1.14)$$

dove i parametri  $a_i$  per  $i = 1, 2, 3$  descrivono i tempi di insorgenza degli shock; i  $b_i$  per  $i = 1, 2, 3$  esprimono la persistenza delle perturbazioni ed hanno solitamente valori negativi, ad indicare che gli effetti sono stati riassorbiti; i parametri  $c_i$  per  $i = 1, 2, 3$  rappresentano invece l'intensità e il segno degli impulsi. Le funzioni indicatrici assumono valore 1 se l'evento indicato a deponente è verificato e 0 altrimenti: esse permettono di attivare l'impulso solamente a partire dall'inizio (stimato) dello shock. L'integrale definito della funzione  $x(t)$  assume la forma

$$\int_0^t x(\tau) d\tau = t + c_1 \frac{1}{b_1} (e^{b_1(t-a_1)} - 1) I_{t \geq a_1} + c_2 \frac{1}{b_2} (e^{b_2(t-a_2)} - 1) I_{t \geq a_2} + c_3 \frac{1}{b_3} (e^{b_3(t-a_3)} - 1) I_{t \geq a_3}. \quad (1.15)$$

### 1.3 Il modello di Guseo-Guidolin

Un ulteriore limite del modello di Bass è quello di considerare un mercato potenziale che non varia nel tempo: questo rappresenta una visione che in diversi casi non è soddisfacente. Spesso infatti gli sforzi di comunicazione relativa all'innovazione influenzano il processo diffusivo modificandone il mercato potenziale  $m$ , fatto che dimostra come esso non sia costante per tutta la fase di adozione e sia strettamente legato all'informazione che del prodotto viene data. Ne deriva che comunicazione e adozione sono due fasi distinte del processo di diffusione e per questo devono essere modellate separatamente.

Un concetto chiave per comprendere ciò che verrà detto in seguito è quello di *absorptive capacity* (Cohen e Levinthal, 1990), ovvero "l'abilità di riconoscere il valore di una nuova informazione, di assimilarla e di applicarla". La capacità di comprendere a fondo un'innovazione è perciò tanto maggiore quanto maggiore è il livello di conoscenza acquisita sull'argomento. L'adozione di un'innovazione in uno specifico contesto sociale può essere vista come la prova dell'esistenza di un'*absorptive capacity*, in quanto il mercato potenziale può rappresentare una misura di essa.

Di fondamentale importanza per permettere la formazione di una conoscenza collettiva è la struttura comunicativa, la quale è pensabile come un insieme di collegamenti informativi tra le varie unità che compongono il sistema. Per questo lo sviluppo di una conoscenza collettiva è rappresentabile come un network in continua evoluzione, nel quale esistono molteplici collegamenti, di cui alcuni crescono ed altri si interrompono. Considerare il mercato potenziale  $m(t)$  come una funzione di questo processo della conoscenza lo rende dipendente da una rete di connessioni che è variabile nel tempo. La dinamica di tale rete viene descritta non solo in termini di positiva diffusione delle informazioni, ma anche di cattiva comunicazione e passaparola negativo.

Come è già stato detto precedentemente, il modello di Bass non riesce a percepire gli effetti del processo di comunicazione che sta alla base delle adozioni. Guseo e Guidolin hanno proposto nel 2009 un'estensione del modello di Bass standard in cui si tiene conto della mutabilità del mercato potenziale. Questo modello è a due stadi, poiché rappresenta in maniera separata la fase comunicativa e il vero e proprio processo di adozione, che può avvenire solamente quando c'è una conoscenza sufficiente dell'innovazione.

Il mercato potenziale variabile viene definito nel modo seguente:

$$m(t) = k \sqrt{\frac{1 - e^{-(p_c + q_c)t}}{1 + \frac{q_c}{p_c} e^{-(p_c + q_c)t}}} \quad (1.16)$$

I parametri  $p_c$  e  $q_c$  denotano rispettivamente le componenti esterna ed interna del processo di comunicazione e generano il mercato potenziale non costante, mentre  $k$  è il mercato potenziale asintotico. Con  $k$  si intende infatti il numero di persone informate al tempo  $t$  e può rappresentare il caso limite di  $m(t)$  che si verifica quando tutti gli individui informati adottano, anche se in generale ci si aspetta che  $m(t)$  sia minore di  $k$ . Da questa espressione è chiaro come il mercato potenziale dipenda dal processo di diffusione dell'informazione.

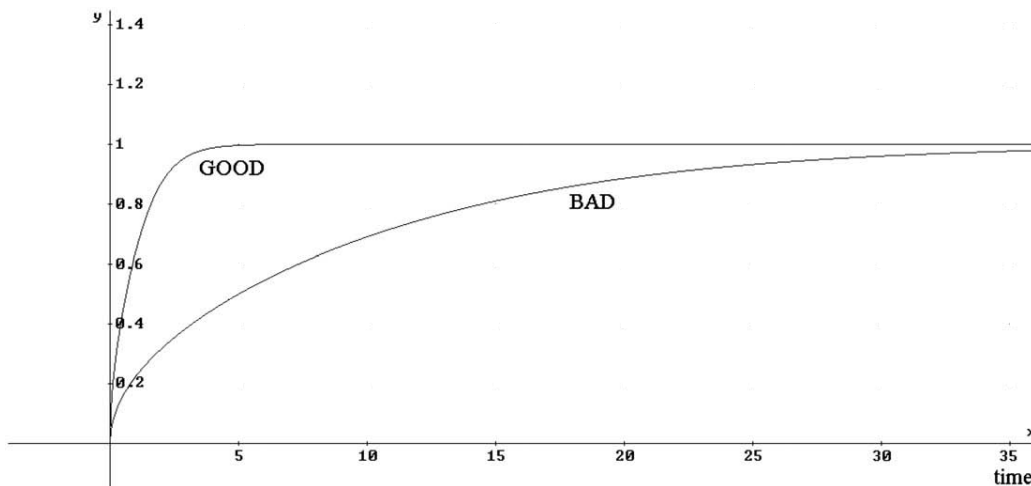


Figura 1.3 - Gli effetti della comunicazione sul mercato potenziale variabile normalizzato.  
Buona comunicazione:  $p_c=0.15$ ,  $q_c=0.9$ ; Cattiva comunicazione:  $p_c=0.01$ ,  $q_c=0.06$

Se omettiamo, per semplicità, una componente di decadimento (dovuta alla cessazione dell'adozione da parte di alcuni adottanti) presente nel modello di Guseo-Guidolin originale e posti i vincoli  $z(0) = 0$  e  $z(t) = 0$  per  $t < 0$ , tale modello assume la forma di un'equazione differenziale del tipo:

$$z'(t) = m(t) \left\{ \left( p_s + q_s \frac{z(t)}{m(t)} \right) \left( 1 - \frac{z(t)}{m(t)} \right) \right\} x(t) + z(t) \frac{m'(t)}{m(t)}, \quad (1.17)$$

dove  $z(t)$  sono sempre le vendite cumulate e  $z'(t)$  quelle istantanee,  $x(t)$  è l'eventuale funzione di intervento e  $z(t)m'(t)/m(t)$  è un effetto che aumenta o deprime le vendite



a seconda del segno di  $m'(t)$ . I parametri  $p_s$  e  $q_s$  equivalgono ai coefficienti di innovazione e imitazione del modello di Bass e quindi descrivono le dinamiche del processo di adozione.

La soluzione in forma chiusa dell'equazione (1.17) è:

$$z(t) = m(t) \frac{1 - e^{-(p_s+q_s) \int_0^t x(\tau) d\tau}}{1 + \frac{q_s}{p_s} e^{-(p_s+q_s) \int_0^t x(\tau) d\tau}} \quad (1.18)$$

e quindi, evidenziando anche il processo comunicativo, si avrà

$$z(t) = k \sqrt{\frac{1 - e^{-(p_c+q_c)t}}{1 + \frac{q_c}{p_c} e^{-(p_c+q_c)t}} \frac{1 - e^{-(p_s+q_s) \int_0^t x(\tau) d\tau}}{1 + \frac{q_s}{p_s} e^{-(p_s+q_s) \int_0^t x(\tau) d\tau}}}. \quad (1.19)$$

La formula (1.19) ci mostra la co-evoluzione e la netta distinzione dei due processi, che per ovvi motivi sono comunque fortemente legati tra loro.

Il modello di Guseo-Guidolin può essere in diversi casi preferibile al Bass standard, in quanto evita i problemi di sovrastima nella prima parte del ciclo e di sottostima del mercato potenziale, a cui è soggetto il secondo modello.



## 2. Stima dei modelli di Bass e di Guseo-Guidolin

L'applicazione del modello di Bass necessita principalmente della stima di tre parametri, che sono il mercato potenziale  $m$ , il coefficiente di innovazione  $p$  e quello di imitazione  $q$ . Essi vengono generalmente stimati utilizzando i dati di vendita cumulati che si hanno a disposizione e il parametro la cui individuazione è più critica è solitamente  $m$ , in quanto è noto come il suo valore venga spesso sottostimato dal modello di Bass. Alcuni studi hanno dimostrato la forte influenza che il numero di dati disponibili ha sulle stime dei parametri, soprattutto quando le osservazioni si concentrano nella prima parte del ciclo di vita. Per disporre di stime dei parametri sufficientemente accurate, infatti, sarebbe preferibile avere dei dati che abbiano già superato il picco delle vendite, anche se ciò implica una riduzione più o meno ampia dell'utilità del modello a fini previsivi: come espongono Mahajan, Muller e Bass in un loro articolo del 1990, "by the time sufficient observations have been developed for reliable estimation, it is too late to use the estimates for forecasting purposes".

Al fine del calcolo delle stime del modello di Bass, è stato verificato come il metodo dei minimi quadrati lineari (OLS) non sia molto appropriato, in quanto tende a fornire parametri di segno negativo, che nel caso di questa categoria di modelli sono poco ragionevoli e sintomo di una generale debolezza strutturale del modello. Per questo motivo viene utilizzato solitamente il criterio dei minimi quadrati non lineari (NLS), che verrà sintetizzato nel paragrafo sottostante assieme ai più noti metodi di stima utilizzati per il modello di Bass (si veda Seber, Wild, 1989).

### 2.1 La regressione non lineare

Si supponga di avere  $n$  osservazioni  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  da un modello non lineare nei parametri e a regressori fissi, del tipo

$$y_i = f(x_i; \vartheta^*) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

dove  $f$  è una relazione funzionale nota,  $E[\varepsilon_i] = 0$ ,  $x_i$  è un vettore di dimensione  $k \times 1$  che è formata dalle variabili esplicative della funzione (nel caso dei modelli di Bass l'unica variabile indipendente è  $t$ ), mentre  $\vartheta^*$  è il vero valore, incognito, di  $\vartheta$  ed esso

appartiene a  $\theta$ , un sottoinsieme di  $R^p$ . Si denoti con  $\hat{\vartheta}$  una stima dei minimi quadrati di  $\vartheta$ , ottenuta minimizzando la devianza  $S(\vartheta)$ , ovvero la somma dei quadrati degli scarti tra le osservazioni  $y_i$  ed il modello  $f(x_i; \vartheta)$

$$S(\vartheta) = \sum_1^n [y_i - f(x_i; \vartheta)]^2 \quad (2.2)$$

in  $\vartheta \in \theta$ . Diversamente dal caso dei minimi quadrati lineari,  $S(\vartheta)$  può presentare molteplici minimi relativi ed altrettanti minimi assoluti.

La stima  $\hat{\vartheta}$  è distorta, ma assumendo che gli  $\varepsilon_i$  siano indipendenti e identicamente distribuiti con varianza  $\sigma^2$ , si dimostra che, sotto determinate condizioni di regolarità,  $\hat{\vartheta}$  e  $s^2 = S(\hat{\vartheta})/(n - p)$  sono stime consistenti di  $\vartheta^*$  e  $\sigma^2$  rispettivamente. Inoltre, se si assume anche la normalità degli  $\varepsilon_i$ , allora  $\hat{\vartheta}$  è anche stimatore di massima verosimiglianza.

Se  $f(x_i; \vartheta)$  è differenziabile in  $\vartheta$  e  $\hat{\vartheta}$  è all'interno di  $\theta$ ,  $\hat{\vartheta}$  soddisferà il sistema di equazioni normali

$$\frac{\partial S(\vartheta)}{\partial \vartheta_r} \Big|_{\hat{\vartheta}} = 0 \quad r = 1, 2, \dots, p \quad (2.3)$$

Si usi, per semplicità, la notazione  $f_i(\vartheta) = f(x_i; \vartheta)$  e si avrà

$$f(\vartheta) = (f_1(\vartheta), f_2(\vartheta), \dots, f_n(\vartheta))' \quad (2.4)$$

e

$$F.(\vartheta) = \frac{\partial f(\vartheta)}{\partial \vartheta'} = \left[ \left( \frac{\partial f_i(\vartheta)}{\partial \vartheta_r} \right) \right]. \quad i = 1, \dots, n \quad r = 1, \dots, p \quad (2.5)$$

Sia quindi  $F.(\vartheta)$  la matrice di dimensione  $n \times p$  contenente le derivate parziali prime della funzione  $f$  rispetto a  $\vartheta'$  e si indichi, per brevità,  $F. = F.(\vartheta^*)$  e  $\hat{F}. = F.(\hat{\vartheta})$ . Usando la notazione matriciale,  $S(\vartheta)$  può essere riscritta come

$$S(\vartheta) = [y - f(\vartheta)]' [y - f(\vartheta)] = \|y - f(\vartheta)\|^2, \quad (2.6)$$

ovvero come il quadrato della norma di  $\varepsilon = y - f(\vartheta)$ .

Quindi derivando la (2.6) rispetto a  $\vartheta$  ed uguagliando a zero, si ottiene:

$$\hat{F}' (y - f(\hat{\vartheta})) = \hat{F}' \hat{\varepsilon} = 0. \quad (2.7)$$

Le (2.7) sono le equazioni normali per il modello non lineare, le cui soluzioni portano alle stime  $\hat{\vartheta}$ , sotto l'ipotesi di ortogonalità  $F \perp \varepsilon$ . Per la maggior parte dei modelli non lineari non è possibile una risoluzione analitica, cosa che rende necessario l'utilizzo di metodi di stima iterativi.

## 2.2 Metodi di stima

### 2.2.1 L'algoritmo di Gauss-Newton

L'algoritmo di Gauss-Newton è ottenibile a partire da un'approssimazione in serie di Taylor di  $f_i(\vartheta)$ , troncata al primo ordine, in un intorno di  $\vartheta^{(a)}$ , dove  $\vartheta^{(a)}$  è un vettore di parametri ritenuto una buona approssimazione, come punto di partenza, della stima  $\hat{\vartheta}$ . Si avrà perciò:

$$f(\vartheta) \approx f(\vartheta^{(a)}) + \frac{\partial f(\vartheta^{(a)})}{\partial \vartheta'} (\vartheta - \vartheta^{(a)}), \quad (2.8)$$

dove  $\frac{\partial f(\vartheta^{(a)})}{\partial \vartheta'} = F \cdot (\vartheta^{(a)})$ , utilizzando la notazione precedente. Per brevità, si indichi  $F \cdot (\vartheta^{(a)})$  con  $F \cdot^{(a)}$ . Usando l'approssimazione (2.8) nella (2.6) si ottiene:

$$\begin{aligned} S(\vartheta) &= [y - f(\vartheta)]' [y - f(\vartheta)] \approx \\ &\approx [y - f(\vartheta^{(a)}) - F \cdot^{(a)} (\vartheta - \vartheta^{(a)})]' [y - f(\vartheta^{(a)}) - F \cdot^{(a)} (\vartheta - \vartheta^{(a)})] = \\ &= [z^{(a)} - F \cdot^{(a)} \beta]' [z^{(a)} - F \cdot^{(a)} \beta], \end{aligned} \quad (2.9)$$

dove si è posto  $z^{(a)} = y - f(\vartheta^{(a)})$  e  $\beta = (\vartheta - \vartheta^{(a)})$ .

Con la nuova notazione, le equazioni (2.7) sono ricondotte ad un modello lineare nel parametro  $\beta$ , risolvibile come segue:

$$\hat{\beta} = (F \cdot^{(a)'} F \cdot^{(a)})^{-1} F \cdot^{(a)'} z^{(a)}. \quad (2.10)$$

Si giunge quindi alla formulazione dell'algoritmo di Gauss-Newton:

$$\vartheta^{(a+1)} = \vartheta^{(a)} + \delta^{(a)}, \quad (2.11)$$

dove  $\delta^{(a)} = \hat{\beta} = \vartheta^{(a+1)} - \vartheta^{(a)} = \left( F^{(a)'} F^{(a)} \right)^{-1} F^{(a)'} \left( y - f(\vartheta^{(a)}) \right)$ .

Il meccanismo iterativo si arresta quando si raggiunge il minimo per  $S(\vartheta)$ , che si verifica quando  $\delta^{(a)}$  è nullo. Perciò si può ritenere accettabile un risultato in cui la differenza tra la stima al passo  $(a + 1)$  e quella ad  $a$  è ragionevolmente piccola, cosa che motiva l'interruzione dell'aggiornamento.

## 2.2.2 L'algoritmo di Levenberg-Marquardt

Il metodo di Levenberg-Marquardt si ottiene dall'algoritmo di Gauss-Newton attraverso la seguente modifica:

$$\delta^{(a)} = \left( F^{(a)'} F^{(a)} + \eta^{(a)} D^{(a)} \right)^{-1} F^{(a)'} \left( y - f(\vartheta^{(a)}) \right), \quad (2.12)$$

dove  $D^{(a)}$  è una matrice diagonale a rango pieno con elementi positivi e spesso, per semplicità,  $D^{(a)} = I_p$ . Il parametro  $\eta^{(a)}$  viene modificato sulla base del valore della devianza  $S(\vartheta)$ . Se quest'ultima si riduce rispetto al passo precedente, al successivo verrà ridotto anche il valore di  $\eta$ , avvicinando il metodo a quello di Gauss-Newton (nel quale  $\eta = 0$ ); se invece  $S(\vartheta)$  invece aumenta, sarà incrementato anche il valore di  $\eta$  e ciò porta nella direzione del criterio della discesa massima.

## 2.3 Analisi dei residui

Come esposto da Guseo et al. (2013), una metodologia inferenziale per la stima dei modelli precedentemente esposti può essere descritta tramite un modello di regressione non lineare, del tipo

$$\omega(t) = \eta(\beta, t) + \varepsilon(t), \quad (2.13)$$

dove  $\omega(t)$  rappresenta i dati di vendita cumulati che sono stati osservati,  $\eta(\beta, t)$  indica la componente sistematica, una funzione cumulata dipendente dal tempo  $t$  e da alcuni parametri  $\beta$  (come per esempio le funzioni dei modelli di diffusione), mentre  $\varepsilon(t)$  è la componente stocastica, che esprime la parte residuale. Se il modello relativo alla parte

deterministica è correttamente specificato, si avrà che  $E[\varepsilon_t] = 0$  e che  $Var[\varepsilon_t] = \sigma^2$ , ovvero che la media e la varianza siano costanti per ogni  $t$  e inoltre che non vi sia correlazione tra i residui, quindi  $\sigma_{\varepsilon(i)\varepsilon(j)} = 0$ , per ogni  $i \neq j$ .

Spesso però, nelle applicazioni dei modelli di diffusione ai casi reali, queste tre ipotesi, che contraddistinguono un processo denominato *white noise*, non sono verificate. Per questo motivo, allo scopo di ottenere delle stime apprezzabili, si usa una procedura a due stadi. Per prima cosa si applica uno degli algoritmi visti nei paragrafi precedenti, che non tengono conto della parte residuale del sistema (2.13). In un secondo momento, le previsioni a breve termine  $\eta(\hat{\beta}, t)$ , ottenute con il metodo dei minimi quadrati non lineari, possono essere migliorate tramite un modello ARMAX (*AutoRegressive, Moving Average with an input X*), se i residui non seguono un *white noise standard*. Quest'ultima assunzione può essere diagnosticata in vari modi, ad esempio attraverso il test di Durbin-Watson.

Il perfezionamento delle previsioni di breve periodo attraverso il modello ARMAX si basa sulla seguente struttura:

$$\phi(B)[z'(t) - c\eta(\hat{\beta}, t)] = \theta(B)a_t \quad (2.14)$$

dove  $a_t$  è un processo *white noise*,  $B$  è un operatore di ritardo, mentre  $\phi(B)$  e  $\theta(B)$  sono gli usuali polinomi, rispettivamente di ordine  $p$  e  $q$ , di un modello ARMA. Il parametro  $c$ , detto di calibrazione, permette un accertamento della stabilità dei valori predetti, derivati dal modello  $\eta(\beta, t)$  ed è solitamente pari a 1.

Segue nei successivi paragrafi una rassegna dei principali processi stocastici stazionari, utili per l'analisi delle serie storiche (Di Fonzo, Lisi, 2005).

### 2.3.1 I processi stocastici

Per una definizione di processo stocastico, si consideri uno spazio di probabilità  $(\Omega, F, P)$ , dove  $\Omega$  è lo spazio degli eventi elementari,  $F$  una  $\sigma$ -algebra su  $\Omega$  e  $P$  una misura di probabilità. Dato uno spazio parametrico  $T$ , si definisce processo stocastico una funzione finita e a valori reali di  $\omega \in \Omega$  e  $t \in T$  tale che, per ogni  $t$ ,  $Y_t(\omega)$  è una funzione misurabile di  $\omega$ . Un processo stocastico è pertanto una funzione di due variabili di natura diversa:  $t$ , di natura matematica, che serve a ordinare la famiglia di variabili casuali;  $\omega$ , evento che specifica sullo spazio campionario quale risultato si è verificato per  $t$  fissato.

Si può quindi pensare a un processo stocastico come a una serie di variabili casuali ordinate cronologicamente:

$$\{Y_t, t = t_1, t_2, \dots\}. \quad (2.15)$$

In genere, per semplicità, si usa descrivere un processo stocastico principalmente sulla base dei momenti di primo e secondo ordine delle variabili casuali  $Y_t$ . Infatti, al variare di  $t$ , media, varianza e covarianza definiscono le seguenti funzioni a valori reali:

*Funzione Media*

$$\mu_t = E[Y_t]. \quad (2.16)$$

*Funzione Varianza*

$$\sigma_t^2 = Var[Y_t] = E[Y_t - \mu_t]^2. \quad (2.17)$$

*Funzione Autocovarianza*

$$\gamma_{t_1, t_2} = E\{[Y_{t_1} - \mu_{t_1}][Y_{t_2} - \mu_{t_2}]\}. \quad (2.18)$$

Il significato di media e varianza di una variabile casuale sono già noti e le funzioni “media” e “varianza” di un processo stocastico ne rappresentano semplicemente un’estensione. Per quanto riguarda invece la funzione “autocovarianza”, essa indica la covarianza fra variabili casuali del medesimo processo stocastico distanti tra loro di uno sfasamento temporale  $k = |t_1 - t_2|$ . Per questa ragione la funzione “varianza” può essere interpretata come l’autocovarianza in corrispondenza di uno sfasamento temporale nullo. Poiché l’autocovarianza non è di semplice interpretazione, solitamente se ne effettua la normalizzazione, ottenendo la *funzione di autocorrelazione* (ACF) così definita:

$$\rho_{t_1, t_2} = \frac{\gamma_{t_1, t_2}}{\sigma_{t_1} \sigma_{t_2}}. \quad (2.19)$$

Essa rappresenta una misura della correlazione tra  $Y_{t_1}$  e  $Y_{t_2}$ .

Generalmente, la correlazione tra due variabili può essere dovuta al fatto che esiste effettivamente un legame diretto tra le due oppure al fatto che entrambe sono correlate con una terza variabile. Nel caso delle serie storiche, una parte della correlazione tra  $Y_t$  e  $Y_{t-k}$  è dovuta ai legami che esse hanno con le variabili intermedie, che vanno dal momento  $t - k + 1$  a  $t - 1$ . Per tenere conto di ciò, si può considerare la *funzione di*



*autocorrelazione parziale* (PACF), la quale misura l'autocorrelazione tra le due variabili sfasate di  $k$ , al netto della dipendenza dalle altre variabili intermedie. Questa funzione è perciò pari alla correlazione condizionata

$$P_k = \text{Corr}(Y_t, Y_{t-k} | Y_{t-1}, \dots, Y_{t-k+1}). \quad (2.20)$$

Nelle sezioni successive si tratteranno i principali processi stocastici stazionari, che risulteranno poi utili in fase di analisi. È opportuno per questo definire il concetto di stazionarietà: un processo è detto *debolmente stazionario* se la sua media è costante e la sua funzione di auto covarianza dipende solo da  $k$ , in modo tale che

$$\begin{aligned} E[Y_t] &= \mu & \forall t, \\ \text{Cov}[Y_t, Y_{t+k}] &= \gamma_k & \forall t, \forall k. \end{aligned} \quad (2.21)$$

### 2.3.2 Processo rumore bianco (white noise)

Il processo white noise è uno dei più importanti processi stocastici. Come è già stato anticipato precedentemente, si tratta di un processo  $\{\varepsilon_t\}$  che consiste di una sequenza di variabili casuali incorrelate a media nulla e varianza costante. La funzione di autocorrelazione di tale processo è

$$\rho_k = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ 0 & k = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}. \quad (2.22)$$

La funzione di autocorrelazione parziale  $P_k$  è in questo caso uguale a  $\rho_k$ , in quanto le componenti del processo sono incorrelate.

### 2.3.3 Processo a media mobile MA( $q$ )

Sia  $\{\varepsilon_t\}$  un processo white noise di media nulla e varianza  $\sigma_\varepsilon^2$ . Un processo a media mobile di ordine  $q$  è definito come

$$Y_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (2.23)$$

con  $\theta_j$  (per  $j = 0, \dots, q$ ) parametri costanti e viene indicato con l'acronimo MA( $q$ ). Nella (2.23) quindi la variabile  $Y_t$  è descritta come il risultato della somma di vari impulsi

casuali (quello presente e quelli passati), la cui intensità e segno sono dati dai coefficienti  $\theta_j$ .

La funzione media di un processo MA( $q$ ) è pari a

$$E[Y_t] = E[\varepsilon_t - \theta_1\varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q\varepsilon_{t-q}] = 0, \quad (2.24)$$

mentre la funzione di autocorrelazione è

$$\rho_k = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ \frac{-\theta_k + \theta_1\theta_{k+1} + \theta_2\theta_{k+2} + \dots + \theta_{q-k}\theta_q}{1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2} & k = 1, \dots, q \\ 0 & k > q \end{cases} \quad (2.25)$$

La funzione di autocorrelazione parziale  $P_k$  tende ad annullarsi al crescere di  $k$ .

### 2.3.4 Processo autoregressivo AR( $p$ )

Sia  $\{\varepsilon_t\}$  il consueto processo white noise di media nulla e varianza  $\sigma_\varepsilon^2$ . Si dice che  $\{Y_t\}$  è un processo autoregressivo di ordine  $p$ , indicato con AR( $p$ ), se

$$Y_t = \phi_0 + \phi_1 Y_{t-1} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (2.26)$$

dove  $\phi_i$ , per  $i = 0, \dots, p$ , sono parametri costanti. La variabile  $Y_t$  è considerata in questo caso come la somma di valori passati e di una componente casuale contemporanea.

La media di un processo autoregressivo è data da

$$\mu = E[Y_t] = \frac{\phi_0}{1 - \phi_1 - \dots - \phi_p} + \varepsilon_t. \quad (2.27)$$

Il risultato nella (2.27) fa capire che la media di  $Y_t$  è zero se e solo se  $\phi_0 = 0$ .

In un processo AR( $p$ ) stazionario, l'autocorrelazione  $\rho_k$  tende ad annullarsi al divergere di  $k$ , mentre per quanto riguarda la funzione di autocorrelazione parziale  $P_k$  all'aumentare di  $k$ , essa è diversa da zero per  $k \leq p$  e si annulla per  $k > p$ .

### 2.3.5 Processo autoregressivo a media mobile ARMA( $p, q$ )

Nelle forme pure dei processi AR e MA si possono avere molti parametri. Una forma più parsimoniosa dal punto di vista parametrico è ottenuta con un modello misto. Partendo ancora una volta dal processo white noise  $\{\varepsilon_t\}$  a media nulla e varianza

costante, si dirà che  $\{Y_t\}$  è un processo autoregressivo a media mobile di ordine  $(p, q)$ , e lo si indica con ARMA( $p, q$ ), se

$$Y_t - \sum_{i=1}^p \phi_i Y_{t-i} = \phi_0 + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}. \quad (2.28)$$

Risulta evidente che quando  $p = 0$  si torna ad avere un MA( $q$ ) e quando  $q = 0$  si ha un modello AR( $p$ ). Inoltre la media del processo è pari a zero se e solo se  $\phi_0 = 0$ .

La funzione di autocorrelazione di un processo ARMA( $p, q$ ) è pari a

$$\rho_k = \begin{cases} \gamma_k & k = 0, 1, \dots, q \\ \gamma_0 & \\ \phi_1 \rho_{k-1} + \dots + \phi_p \rho_{k-p} & k \geq q + 1 \end{cases} \quad (2.29)$$

Per  $k > q$  l'ACF tende ad annullarsi come un processo AR( $p$ ) e il modo in cui tende a zero dipende dal valore dei parametri  $\phi_i$ . Per quanto riguarda invece la PACF, si nota che per  $k > p$  essa tende ad annullarsi in maniera esponenziale, come avviene per i processi MA( $q$ ), e in un modo che dipende dai valori dei parametri  $\theta_j$ .

### 2.3.6 Il test di Durbin-Watson

Per valutare la presenza di una qualche forma di autocorrelazione tra i residui è possibile utilizzare il test di Durbin-Watson, che verifica l'ipotesi nulla di assenza di correlazione contro quella alternativa, che prevede l'esistenza di correlazione, possa essa essere positiva o negativa. La statistica test ha la forma seguente:

$$D = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (2.30)$$

Il valore della statistica test è compreso tra 0 e 4. Se  $D$  assume un valore pari a 2, allora l'ipotesi di incorrelazione è verificata. Valori compresi tra 0 e 2 implicano invece una correlazione positiva tra i residui e, viceversa, valori tra 2 e 4 indicano una correlazione di segno negativo e quindi una certa distanza tra un residuo e il successivo. La distribuzione della statistica di Durbin-Watson non è nota, tuttavia gli stessi Durbin e Watson (1951) hanno calcolato dei valori critici che permettono di testare l'ipotesi nulla ed essi dipendono unicamente dal numero di regressori.

Se si prende ad esempio un livello di significatività  $\alpha$ , bisognerà confrontare la statistica test con i valori limite  $d_{L,\alpha}$  e  $d_{U,\alpha}$ : se  $D$  è all'interno dell'intervallo che ha come estremi i due valori limite, il test è inconcludente.

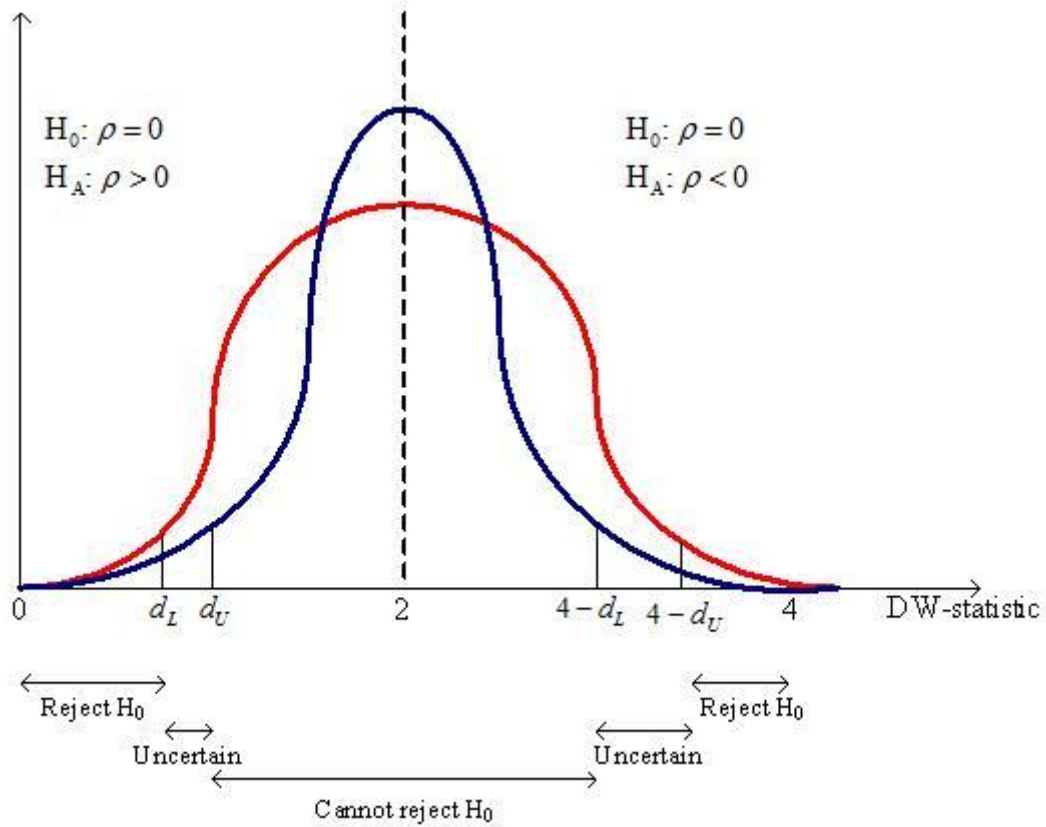


Figura 2.1 - Interpretazione del test di Durbin-Watson

# 3. L'energia nucleare

## 3.1 Cenni storici

L'energia nucleare è l'energia che tiene legata la parte interna dell'atomo, ovvero le particelle che compongono il nucleo.

Il primo a intuire la relazione tra materia ed energia, fino ad allora considerate realtà totalmente separate, fu il fisico tedesco Albert Einstein. Egli nel 1905 elaborò la famosa teoria dell'equivalenza di massa ed energia, rappresentabile nella formula:

$$E = mc^2$$

dove con  $E$  si intende l'energia meccanica, espressa in Joule, con  $m$  la massa a riposo in chilogrammi e con  $c$  la velocità della luce, approssimabile a 300.000.000 m/s.

L'elevato valore della costante  $c^2$  fa capire come anche da una piccola porzione di materia sia liberata una considerevole quantità di energia.

Ci sono due principali processi per ottenere energia dai nuclei atomici, quindi dalla materia: la fusione e la fissione.

La reazione di fusione nucleare consiste nell'unione di due o più nuclei leggeri, come per esempio quelli degli isotopi dell'idrogeno, in maniera tale da ottenerne uno più pesante. Ad oggi non è stato ancora possibile creare reazioni stabili di fusione nucleare controllata.

La reazione di fissione nucleare, l'unica attualmente ad essere utilizzata in campo industriale, consiste invece nella divisione di un nucleo pesante (generalmente quello dell'uranio 235, particolarmente instabile) in nuclei più piccoli.

Per ottenere la fissione viene sparato un fascio di neutroni contro il nucleo del

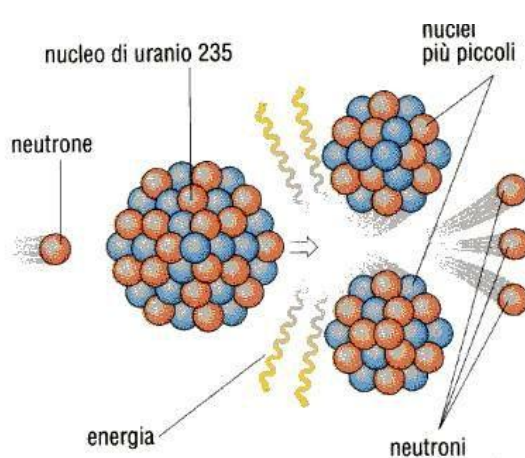


Figura 3.1 - Schema della fissione di un nucleo di uranio 235

materiale fissile, che si scinde in due nuclei più piccoli e libera dei neutroni e una quantità considerevole di energia (Figura 3.1). I neutroni risultanti dalla reazione bombardano a loro volta altri nuclei fissili con lo stesso risultato precedente, creando una reazione a catena, con conseguente rilascio di energia.

Fu un gruppo di scienziati italiani, sotto la guida del fisico Enrico Fermi, a scoprire il potenziale della fissione nucleare, quando nel 1934 bombardò degli atomi di uranio con dei neutroni e notò che i prodotti risultanti da tale reazione erano, insieme, più leggeri dell'uranio.

Gli studi vennero poi portati avanti nel 1938 dal chimico tedesco Otto Hahn, che per la prima volta riuscì a dimostrare il principio della fissione nucleare.

Nel 1938 ad Enrico Fermi, emigrato negli USA a Chicago, venne affidato il compito di progettare il primo reattore nucleare, denominato Chicago Pile-1.

Quattro anni più tardi il suddetto reattore entrò in funzione e nacque il *Progetto Manhattan*, gruppo di scienziati coordinati da Fermi che utilizzò il principio della fissione nucleare per costruire la bomba atomica, arma che con effetti devastanti portò alla conclusione della Seconda Guerra Mondiale nel 1945.

Nel 1953 il presidente degli Stati Uniti d'America Eisenhower presentò il progetto *Atoms for Peace* allo scopo di favorire l'applicazione civile dell'energia nucleare, in particolare per la produzione di energia elettrica.

Nello stesso anno venne realizzata la prima centrale nucleare della storia nello Stato dell'Idaho, USA, in grado di fornire energia elettrica a una piccola città.

Per quanto riguarda gli Stati non in possesso di armi nucleari, gli sforzi iniziali per continuare ad utilizzare questa fonte di energia solamente per scopi pacifici, portarono nel 1957 alla formazione della IAEA (*International Atomic Energy Agency*) e nel 1968 alla stipula del Trattato sulla non proliferazione delle armi nucleari (*Nuclear Non-Proliferation Treaty*).

Dagli anni Cinquanta l'utilizzo dell'energia nucleare per scopi civili subì una rapida crescita, fino a riguardare gran parte dei Paesi industrializzati: in molte Nazioni lo shock petrolifero del 1973 si rivelò fondamentale nel rafforzare l'iniziativa del governo nei confronti dell'energia atomica.

Negli anni Ottanta e Novanta si ebbe un rallentamento, dovuto in particolar modo agli incidenti di Three Mile Island (1979, USA) e di Černobyl' (1986, attuale Ucraina). Dopo questi disastri molti Stati decisero infatti di rivedere e ridurre i loro progetti relativi al nucleare (se non addirittura di eliminarli, come nel caso dell'Italia), anche in relazione al fatto che molta della popolazione cominciava a dimostrare diffidenza verso questa forma d'energia, non più considerata sicura.

Con l'inizio del nuovo millennio, come si vedrà anche nelle analisi in seguito, il processo attraversò una fase di stallo ed iniziò un declino, accentuato dal disastro di Fukushima Dai-Ichi (2011, Giappone), evento che ha portato nuovamente l'attenzione

sulla questione sicurezza e obbligato tutte le Nazioni a riconsiderare i propri piani relativi al nucleare. Alcuni Paesi, come per esempio Germania e Svizzera, hanno preso la decisione, al momento irremovibile, di chiudere definitivamente tutte le centrali attive nel territorio nazionale in un prossimo futuro, altri invece, vale anche per lo stesso Giappone, non sembrano ancora disposti a rinunciare ad una risorsa come quella nucleare.

## 3.2 Funzionamento di una centrale elettronucleare

Il funzionamento di una centrale nucleare è molto simile a quello di una qualsiasi altra centrale termoelettrica alimentata, per esempio, a carbone o gas, in quanto si basa sulla produzione di vapore per azionare una turbina, che a sua volta è collegata ad un generatore di elettricità.

A differenza degli impianti convenzionali, però, essa non brucia nessun combustibile.

Per produrre il vapore viene sfruttata la grande quantità di energia generata dalla scissione di particolari nuclei pesanti, come il già citato uranio 235.

Una centrale nucleare è composta da uno o più reattori, la cui parte centrale è il cosiddetto nocciolo, al cui interno avviene la fissione del combustibile nucleare, solitamente uranio o plutonio, adeguatamente disposto in barre.

Queste barre sono immerse in una sostanza che funge da moderatore, rallentando i neutroni in modo da renderli più efficaci per proseguire la reazione a catena. I moderatori più utilizzati sono la grafite e l'acqua, quest'ultima meglio se pesante, ovvero con il deuterio al posto del più leggero idrogeno.

Per evitare che le reazioni di fissione avvengano in maniera incontrollata si usano le cosiddette barre di controllo, realizzate in opportuni materiali come argento, cadmio o carburo di boro. Esse servono appunto a controllare il numero delle reazioni nel nocciolo. Dato che assorbono neutroni, le barre sono in grado di controllare la reazione a catena che, a seconda della maggiore o minore profondità con cui le barre vengono inserite nel nocciolo, può essere accelerata, rallentata o anche arrestata, con conseguente variazione della potenza del reattore. In caso di necessità, il loro inserimento completo provoca l'arresto praticamente istantaneo del reattore.

Per evitare che il nocciolo acquisisca una temperatura troppo elevata, si utilizza un fluido refrigerante, solitamente acqua, che ha appunto la funzione di raffreddare il cuore del reattore e di trasportare all'esterno il calore in esso generato.

Il nocciolo, le barre di controllo e il fluido refrigerante sono contenuti in un recipiente d'acciaio, il vessel.

Intorno al nocciolo del reattore vi sono dei tubi dove scorre l'acqua che, riscaldata dal calore prodotto dalla fissione, viene trasformata in vapore ad alta temperatura. Esso è adoperato per far ruotare le turbine che, collegate ad un alternatore, permettono quindi la produzione di energia elettrica.

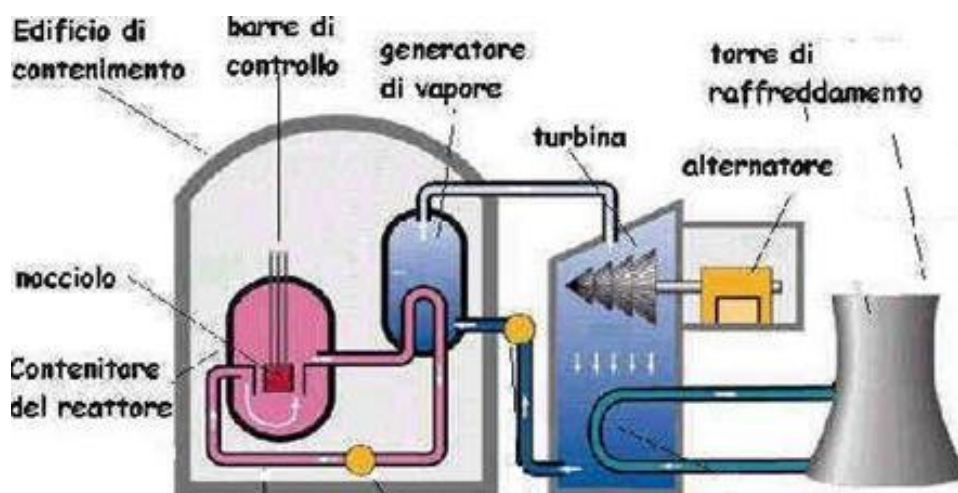


Figura 3.2 - Rappresentazione di una centrale nucleare

### 3.3 Gli incidenti nucleari della storia

Un incidente nucleare è un evento in cui si produce un'emissione di materiale radioattivo o un livello di radioattività capaci di pregiudicare la salute pubblica.

Allo scopo di misurare la gravità di un incidente, nel 1989 la IAEA ha predisposto una scala internazionale, la scala INES (*International Nuclear and radiological Event Scale*), che classifica tutti gli eventi nucleari in ordine ascendente per gravità.

La stessa è divisa in due parti distinte: i guasti (dal primo al terzo livello) e gli incidenti veri e propri (dal quarto al settimo). È presente nella scala anche il livello 0, che classifica come semplici deviazioni degli eventi che non hanno alcun impatto sulla sicurezza nucleare.

INES è una scala logaritmica in base dieci: il passaggio da un livello di essa al successivo implica pertanto un aumento di dieci volte della gravità dell'evento.

Molti sono gli incidenti nucleari effettivamente riconosciuti da IAEA e ancor di più quelli denunciati da associazioni ambientaliste come Greenpeace.



Quelli che senza dubbio rimangono nella memoria collettiva sono però tre: l'incidente di Three Mile Island, il disastro di Černobyl' e quello più recente avvenuto a Fukushima.



Figura 3.3 - Scala INES

### 3.3.1 Incidente di Three Mile Island

Fino agli anni Settanta, le preoccupazioni pubbliche in relazione all'energia nucleare erano piuttosto limitate.

Un punto di svolta si ebbe con l'incidente avvenuto nel 1979 sull'isola di Three Mile Island, in Pennsylvania. Fu il primo disastro in una centrale nucleare di cui venne messa al corrente la popolazione mondiale, da quel momento conscia dei pericoli relativi all'energia nucleare, anche se usata per scopi civili.

Il reattore coinvolto nell'incidente, l'unità 2, era un PWR, ovvero un reattore ad acqua pressurizzata. L'incidente ebbe inizio durante la notte del 28 marzo 1979 nel circuito di refrigerazione secondario, quando un blocco del sistema comportò un aumento della pressione del refrigerante. Esso causò prima l'apertura di una valvola di rilascio posta sul pressurizzatore e poi l'arresto forzato del sistema mediante l'inserimento delle barre di controllo. Dopo pochi secondi dall'arresto la valvola si sarebbe dovuta richiudere, ma ciò non avvenne e ci fu una perdita di refrigerante. Gli operatori non capirono il problema, avendo inviato il comando di chiusura della valvola e pensando che si fosse richiusa, quindi commisero una serie di errori che portarono al parziale svuotamento del circuito di refrigerazione. Questo portò inevitabilmente ad un surriscaldamento del nocciolo, fino alla fusione parziale dello stesso.

Le cause principali dell'incidente risultarono essere la strumentazione carente, in quanto non dava la possibilità di capire l'effettivo stato della valvola, e l'inadeguatezza dell'addestramento del personale.

L'incidente di Three Mile Island è stato classificato al livello 5 della scala INES, quindi come un evento con possibili danni locali. Infatti esso ha causato preoccupazione per l'eventualità di riscontrare, nell'area circostante l'impianto, degli effetti dannosi sulla salute indotti dalle radiazioni, tra cui soprattutto il cancro.

I molti studi indipendenti compiuti sull'incidente hanno dimostrato che non ci sono stati riscontri di un numero anomalo dei casi di cancro attorno all'impianto, anche anni dopo l'evento. Gli stessi studi hanno rivelato che il rilascio di radiazioni durante l'incidente è stato minimo.

Non avendo causato morti né problemi di salute, l'effetto più rilevante dell'incidente è stato quindi lo stress psicologico a cui sono stati sottoposti gli abitanti nelle vicinanze dell'impianto durante e anche dopo l'avvenimento.

### **3.3.2 Disastro di Černobyl'**

Fu nel 1986, quando avvenne il disastro di Černobyl', che nacque un vero e proprio atteggiamento critico nei confronti dell'energia nucleare per i rischi che questa comporta.

Il fatto accadde nella notte del 26 aprile 1986 presso la centrale nucleare V. I. Lenin, situata nell'Ucraina settentrionale, a pochi chilometri dalla città di Černobyl', al confine con la Bielorussia. Durante una fase di spegnimento per manutenzione del reattore 4 e mentre era in corso un test sperimentale sui sistemi di emergenza, ci furono due esplosioni, che non ebbero natura nucleare, ma una causa chimica. La perdita di controllo sulla reazione nucleare da parte dei tecnici, che avevano violato quella notte molte delle norme di sicurezza, portò ad un aumento della potenza e al surriscaldamento del nocciolo, fino al raggiungimento di elevate temperature che fecero arrivare la pressione del vapore dell'impianto di raffreddamento ad un livello esplosivo. Si innescarono anche reazioni fra le sostanze chimiche presenti, inclusa la scissione dell'acqua in ossigeno e idrogeno per effetto della temperatura raggiunta, che contribuì alla formazione di grandi volumi di gas.

Le violente esplosioni scoppiarono il nocciolo del reattore e disseminarono attorno alla centrale materiale e vapore radioattivo, oltre a frammenti del nocciolo stesso, contaminando aria e suolo per più di cento chilometri.

Di portata ben più ampia fu la nube radioattiva che ne fuoriuscì, in quanto essa colpì l'Europa orientale e in misura minore quella occidentale, fino ad arrivare a porzioni della costa orientale del Nord America.

La causa principale dell'incidente fu l'errore umano, dovuto all'ignoranza dei tecnici e alle varie violazioni, volontarie e non, delle norme e delle procedure di sicurezza. Determinanti per il verificarsi del disastro furono anche le caratteristiche specifiche dell'impianto.

L'evento accaduto in Ucraina è stato il più grave incidente nucleare mai verificatosi in una centrale, tanto devastante da essere una delle due catastrofi che hanno raggiunto il settimo livello della scala INES.

Le prime persone ad essere danneggiate furono i lavoratori presenti nel sito nella notte, due dei quali morirono nell'esplosione, e i soccorritori, che ricevettero una dose molto alta di radiazioni. Di essi, 28 morirono nei tre mesi successivi all'incidente e altri 19 nel periodo tra 1987 e 2004, anche se non tutti per cause direttamente riconducibili al disastro. Gli incendi provocati, almeno trenta, vennero spenti definitivamente dopo qualche ora, tranne quello della grafite, poiché non bastava solo dell'acqua. Si decise di seppellire la grafite in combustione sotto materiali di varia natura, come carburo di boro, sabbia, argilla e dolomia. La grafite smise di bruciare dopo nove giorni, ma sotto le macerie la reazione a catena continuò, rischiando di provocare ulteriori esplosioni. Il

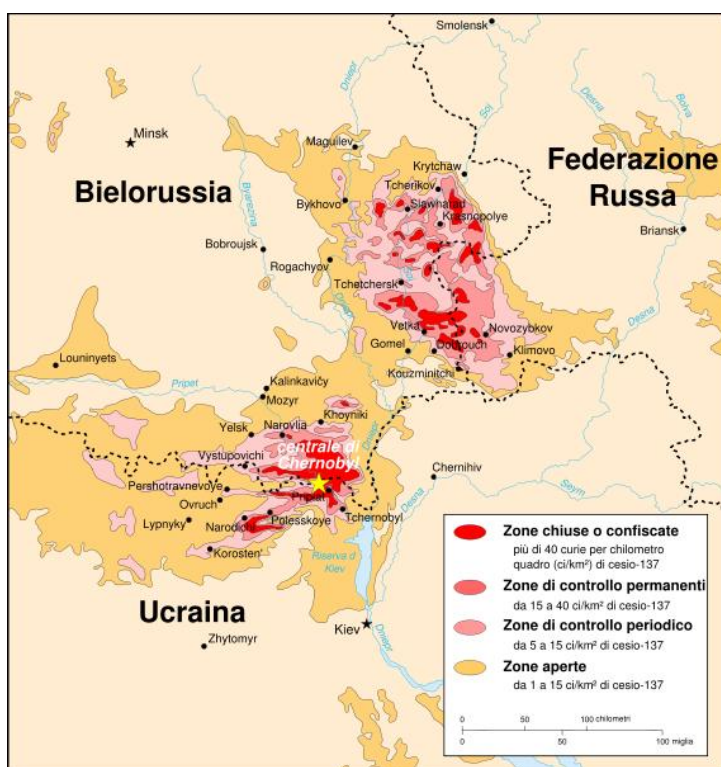


Figura 3.4 - Contaminazione di cesio-137 nel 1986

materiale con cui si rivestì il nocciolo provocò un "effetto serra", aumentandone la temperatura e incrementando il rilascio di radionuclidi.

Il tutto venne perciò coperto con un sarcofago di cemento e metallo, per limitare al massimo le emissioni.

I radionuclidi rilasciati, che si depositarono poi al suolo, furono principalmente lo iodio-131, il cesio-134 e il cesio-137.

A causa dell'alta pericolosità di questi materiali radioattivi, le autorità sovietiche imposero

l'evacuazione dei residenti in un raggio di 30 km dalla centrale, cosa che comportò il reinsediamento in altre aree di circa 116.000 persone. Furono invece circa 270.000 le persone che continuarono a vivere in zone esterne a quel raggio, ma comunque fortemente contaminate.

I danni relativi al disastro sono ancora oggi motivo di accese discussioni.

Allo scopo di produrre un resoconto scientifico riguardo al numero delle vittime e ai danni a salute ed ambiente, l'ONU promosse un incontro istituzionale, il *Chernobyl Forum*, a cui presero parte le maggiori organizzazioni dell'ONU, oltre agli istituti della sanità di Ucraina, Bielorussia e Russia, i Paesi più colpiti dal disastro. Dopo vari incontri, il bilancio fu di 65 morti accertati con sicurezza e di 4.000 morti presunte, che non potranno mai essere imputate direttamente all'incidente, per leucemie e tumori su un arco di 80 anni.

Sudette stime sono state contestate da alcuni partiti politici, come il gruppo dei Verdi del Parlamento Europeo che stimò un numero di morti imputabili all'incidente tra le 30.000 e le 60.000, e altre formazioni antinucleariste come Greenpeace, che fornì la cifra di 6 milioni di morti per tumore direttamente imputabili a Černobyl' fra tutta la popolazione mondiale nell'arco di 70 anni.

### **3.3.3 Disastro di Fukushima Dai-Ichi**

L'11 marzo 2011 un lungo e potente terremoto, seguito da un maremoto di altrettanta portata, devastò la costa orientale del Tōhoku, in Giappone.

Le due calamità naturali colpirono 14 reattori in quattro diverse centrali, causando i danni maggiori nella centrale di Fukushima Dai-Ichi, di cui toccarono tutti i sei reattori.

I reattori 1, 2, 3 e 4 della centrale stessa vennero devastati, cosa che ebbe come risultato il rilascio di enormi quantità di radiazioni e materiale radioattivo nell'ambiente. I restanti dieci reattori riuscirono ad evitare lo scioglimento del nocciolo per una serie di fortunate circostanze.

Al momento della scossa principale, nel sito di Fukushima Dai-Ichi i primi tre reattori erano in funzione, mentre gli altri tre erano in arresto per manutenzione, riparazione e rifornimento di combustibile. Nell'unità 4 era in corso la sostituzione del coperchio del nocciolo e tutte le componenti del combustibile erano state spostate nella piscina di raffreddamento del combustibile esaurito.

Tutte le cinque linee elettriche che stavano trasmettendo elettricità a e da Fukushima Dai-Ichi furono distrutte dal terremoto. I generatori diesel di emergenza, due per ogni unità di reattori a turbina, si avviarono automaticamente. Meno di un'ora più tardi, le

unità furono sovrastate da un'onda che superava i tredici metri e tutti i generatori diesel furono messi fuori servizio, privando la centrale di qualsiasi fonte di energia elettrica.

Per il reattore numero 1 si sono riscontrate variazioni di temperatura e pressione molto forti, che crearono uno shock termico a cui conseguì un grave danneggiamento del vessel. Il nocciolo rimase quindi a lungo scoperto, fuse totalmente e ruppe il fondo del vessel, per poi uscire all'esterno nel basamento del reattore.

Nel reattore numero 3 diminuì notevolmente il livello di acqua nel vessel, cosa che fece aumentare la pressione all'interno del contenitore primario e che comportò l'esplosione dello stesso il 14 marzo. Ci fu una perdita considerevole di materiale radioattivo anche all'esterno, in quanto venne distrutta la parte superiore dell'edificio.

Anche nel reattore numero 2 divenne impossibile refrigerare il nocciolo e l'aumento della pressione provocò il 15 marzo un'esplosione ed il rilascio di materiale, ma poiché l'incidente avvenne alla base del vessel, l'edificio esterno non venne particolarmente danneggiato.

L'esplosione che danneggiò il reattore numero 4 interessò invece la piscina del combustibile e distrusse il contenitore secondario, poiché al momento esso era spento e non vi era combustibile nel nocciolo.

Complessivamente l'incidente venne nella prima settimana stimato al grado 4 della scala INES, corrispondente ad un incidente senza conseguenze rilevanti, per poi passare al grado 5, al pari di Three Mile Island. Infine venne classificato al grado 7 della scala, raggiunto fino ad allora solo dal disastro di Černobyl', considerando l'insieme degli eventi e non più i singoli incidenti distinti, che vanno dal livello 3 al 5.

Non ci sono stati casi di avvelenamento da radiazione o di morte attribuibile a cause radiologiche, ma molte persone sono state evacuate dalle loro case per assicurarsi che non ci fossero conseguenze sulla salute. Ad aprile 2013, più di 150.000 persone sono ancora costrette a rimanere in aree limitate lontane dalle loro comunità e altre 10.000 devono cercare rifugio al di fuori delle loro città in zone non contaminate.

Secondo la TEPCO, la società che gestisce l'impianto in cui si è verificato il disastro, le conseguenze a pochi mesi dall'incidente non potevano ancora essere paragonate a quelle di Černobyl', in quanto le emissioni tossiche erano circa il 10% di quelle dell'impianto ucraino.

In contrasto con i dati rassicuranti forniti da TEPCO, uno studio commissionato da Greenpeace ad un esperto di sicurezza atomica ha rivelato che la quantità totale di radionuclidi di iodio 131 e cesio 137 rilasciata tra l'11 e il 13 marzo 2011 equivaleva già al triplo del valore minimo per classificare un incidente di livello 7.

Per capire la differenza tra i due disastri, si pensi che il materiale radioattivo a Černobyl' venne sigillato dentro ad un sarcofago in un breve lasso di tempo, cosa che interruppe la fuoriuscita di radiazioni, mentre a Fukushima questa soluzione non è stata praticabile. Per questo la contaminazione è sempre crescente ed inarrestabile e si pensa continuerà ininterrottamente per un indefinito numero di anni. Inoltre l'incidente giapponese non ha comportato l'inquinamento solo di aria e suolo, ma anche dell'Oceano Pacifico.

## 3.4 Produzione e consumo di energia nucleare

### **3.4.1 USA**

Gli Stati Uniti sono il Paese con il maggior numero di impianti nucleari al mondo, disponendo di 100 reattori commerciali attualmente operativi. Si tratta comunque del più basso numero di reattori funzionanti dal 1986, anno del disastro di Černobyl'.

Per quanto riguarda il consumo dell'energia nucleare, gli Stati Uniti hanno usufruito nel 2012 di 809,8 TWh, riportando un calo pari al 2,9% rispetto all'anno precedente. Il declino della produzione e del consumo è da attribuire in parte al prolungato spegnimento di quattro unità, che furono inattive per la maggior parte dell'anno, oltre alle interruzioni per rifornimento di combustibile di molti altri reattori.

Gli impianti nucleari hanno fornito il 19% dell'elettricità statunitense nel 2012.

Nella prima metà del 2013 sono state chiuse quattro unità, cosa che non avveniva dal 1998. Tre di esse necessitavano di grosse riparazioni che comunque non avrebbero né eliminato né ridotto il rischio di successivi incidenti nei rispettivi impianti.

La mancanza di avvii di nuovi reattori ha comportato un continuo invecchiamento degli impianti. A maggio 2013, l'età media per unità era di 33,4 anni, tra le più alte in tutto il mondo, con 22 reattori operativi da almeno 40 anni. Si stanno sviluppando dei progetti per permettere ai reattori di operare potenzialmente fino a 60 anni. Fino a giugno 2013, 72 delle 100 unità hanno ricevuto un'estensione della licenza, mentre per altre 18 l'applicazione del prolungamento è sotto esame. Secondo il *Dipartimento dell'Energia* la vita operativa di molti dei reattori attualmente in funzione potrebbe essere estesa almeno fino al 2040, quando molti di essi avranno superato i 60 anni d'età. Ciò appare piuttosto rischioso, considerando che già oggi una grossa riparazione è considerata un buon motivo per spegnere un reattore definitivamente.

Con il Presidente George W. Bush la politica energetica del Paese aveva come obiettivo la costruzione entro il 2010 di due nuovi reattori, anche se esso non è mai

stato raggiunto. È tra febbraio e marzo 2012 che, per la prima volta dopo circa 35 anni, la *Nuclear Regulatory Commission*, l'organismo statunitense responsabile della sicurezza nucleare, ha concesso la licenza a due impianti per avviare la costruzione di nuovi reattori nucleari, che è iniziata a marzo 2013. I lavori hanno al momento sfiorato il budget di costi previsto e stanno procedendo lentamente, essendo stati soggetti a svariati rinvii.

A causa del repentino sviluppo del gas non convenzionale, i prezzi negli USA di questa forma di energia rimangono bassi e ciò non fa che aumentare l'incertezza riguardo la costruzione di nuovi impianti nucleari. Nei primi tre mesi del 2013, dell'energia elettrica prodotta da tutti i nuovi impianti statunitensi appena collegati alla rete, l'82% proveniva da fonti rinnovabili, il restante da gas naturale, mentre niente da carbone o nucleare.

### **3.4.2 Francia**

La Francia rappresenta un'eccezione nel settore del nucleare. In risposta alla crisi petrolifera del 1973, l'anno successivo il Governo francese lanciò il più grande programma al mondo per quanto riguarda l'energia nucleare commerciale. Dopo quarant'anni di immutato supporto nei confronti di questa risorsa, il nuovo Governo, sotto la guida del presidente François Hollande, ha promesso un radicale cambiamento nella politica energetica del Paese.

Nel 2012 i 58 reattori presenti in Francia hanno permesso un consumo di 425,4 TWh, un calo di quattro punti percentuali rispetto al 2011. Inoltre gli impianti hanno fornito nello scorso anno il 74,8% dell'elettricità nazionale, dato in calo rispetto all'anno precedente, quando era stato superato il 77%.

In Francia il picco stagionale del carico elettrico è aumentato velocemente dalla metà degli anni Ottanta, in particolar modo per l'introduzione su larga scala del riscaldamento elettrico per ambienti ed acqua. Oltre il 30% delle famiglie francesi attualmente come fonte di riscaldamento usa l'elettricità, che è la forma più dispendiosa per produrre calore poiché provoca la perdita della maggior parte dell'energia primaria durante i processi di trasformazione, trasporto e distribuzione.

Considerate la sua attuale sovraccapacità nucleare e l'età media dei suoi reattori (28,4 anni a metà del 2013), la Francia non avrebbe bisogno di costruire nuove unità ancora per molto tempo. Se il Governo francese e la *Électricité de France* (EDF) decidessero di costruire una nuova unità, ciò non sarebbe da attribuire a vincoli di capacità, bensì al fatto che l'industria nucleare ha serie difficoltà a rimanere competitiva.

Nel dicembre 2007, la EDF cominciò la costruzione di un reattore nella centrale di Flamanville. Essa però incontrò subito problemi di controllo della qualità, che comportarono il rinvio dei lavori al 2012. Il progetto è quindi almeno in ritardo di quattro anni, il costo dell'operazione è in questi anni più che raddoppiato e si prevede che il reattore non sarà operativo prima del 2016.

Già prima dell'incidente di Fukushima, ma in particolare dopo l'11 marzo 2011, ci sono state grosse difficoltà con grandi progetti di investimento in Italia, Regno Unito e Stati Uniti, poiché tutti hanno subito delle perdite a causa della situazione patrimoniale delle principali compagnie nucleari francesi.

Il Governo attuale con il presidente Hollande costituisce un'evidente rottura non solo con il suo predecessore Nicolas Sarkozy, ma anche con le precedenti amministrazioni. Per la prima volta dal 1974, in Francia sono stati ufficialmente annunciati dei piani per la chiusura dei più vecchi reattori operativi, connessi alla rete dal 1977, per l'abbandono di un nuovo progetto di costruzione e per la sistematica riduzione della quota di elettricità generata da nucleare, che dovrebbe passare dal 75 al 50% entro il 2025.

### **3.4.3 Germania**

Nel 2012 in Germania i consumi di energia nucleare sono stati di 99,5 TWh, l'8,1% in meno dell'anno precedente e se si guarda al 2010, il calo dei consumi è di 29,2 punti percentuali. La produzione nucleare ha fornito nel 2012 il 16,1% dell'elettricità nazionale, l'1,5% in meno rispetto all'anno di Fukushima.

La Germania ha apportato tra tutti i Paesi il cambiamento più sostanziale alla propria politica energetica.

Il 14 marzo 2011, il cancelliere Angela Merkel annunciò che i piani di estensione della vita degli impianti sarebbero stati messi in attesa e iniziò così l'inversione della politica nucleare del Paese. Quattro giorni dopo l'11 marzo, il Governo tedesco, fino ad allora a favore del nucleare, decise di spegnere 8 dei 17 reattori operativi in tutta la Nazione. Originariamente pensata per un periodo di soli tre mesi, la chiusura della quasi metà dei reattori tedeschi si rivelò poi permanente.

All'inizio di giugno dello stesso anno, il Governo approvò una legge riguardo un cambiamento energetico di larga portata, che venne poi approvata anche dal Bundestag quasi all'unanimità ed entrò in vigore da agosto. Questa prevede, oltre allo spegnimento definitivo degli 8 reattori descritto in precedenza, la chiusura di tutti i 9 impianti nucleari restanti, in un arco di tempo che va dal 2015 al 2022. Inoltre pone



come obiettivo un aumento dell'efficienza energetica e dell'uso di energie rinnovabili e di gas naturale.

Gli eventi di Fukushima e le reazioni politiche ad essi hanno accelerato le svolte strategiche delle industrie tedesche. Basti pensare che il gigante dell'elettronica Siemens, che ha costruito tutti gli impianti nucleari della Germania e ne ha esportati anche all'estero, annunciò già nel settembre 2011 che sarebbe uscito totalmente dal settore nucleare.

La decisione di portare la Germania ad una graduale eliminazione dell'energia nucleare ha suscitato un notevole interesse in tutto il mondo e qualche scetticismo riguardo il modo in cui la Nazione dovrà recuperare l'elettricità che prima era ottenuta da fonte atomica. In realtà la Germania ha fatto notevoli progressi sul fronte dell'efficienza energetica, riducendo il consumo lordo dell'elettricità dell'1,4% nel 2011 e di un ulteriore 1,3% nel 2012, mentre la produzione di energie rinnovabili è aumentata del 32% nel corso dello stesso periodo e rappresentava nel 2012 il 22% del mix energetico.



## 4. Analisi statistica dei consumi di energia nucleare in USA, Francia e Germania

Nel seguente capitolo verranno analizzate le serie storiche dei consumi di energia nucleare negli Stati Uniti, in Francia e in Germania. I dati provengono dal BP Statistical Review of World Energy<sup>1</sup>, pubblicato a giugno 2013, e si riferiscono ai consumi annuali nei tre Paesi dal 1965 al 2012, espressi in Terawatt-ora (TWh).

Per prima cosa appare opportuno confrontare graficamente le tre serie storiche, come proposto in Fig.4.1:

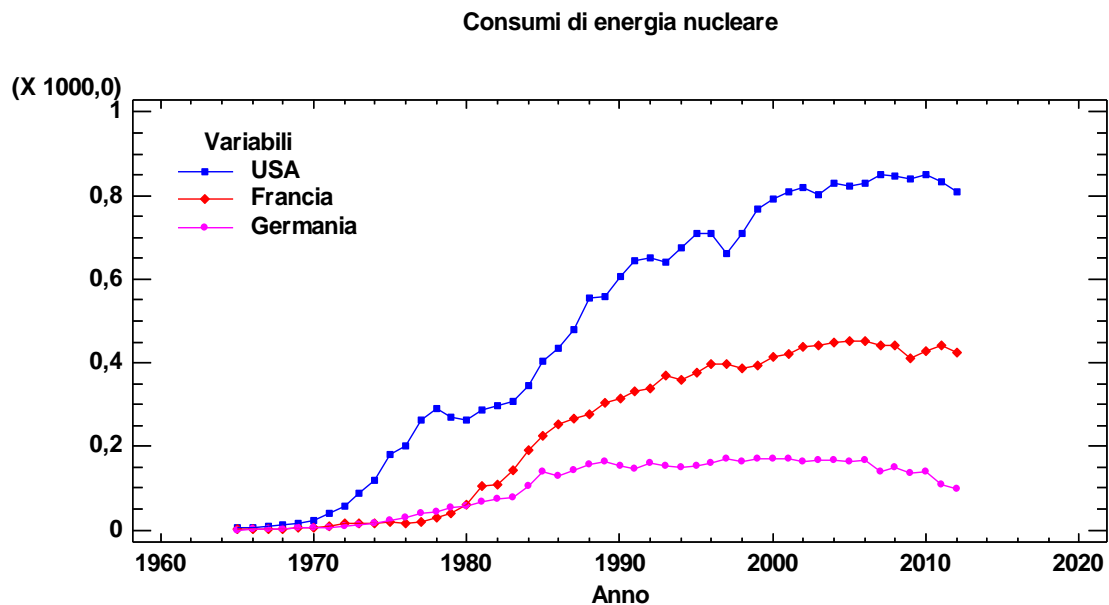


Figura 4.1 – Serie storiche dei consumi di energia nucleare in Usa, Francia e Germania

Ciò serve a notare come, sebbene in misura diversa, le tre serie assumano un andamento simile a quello del *ciclo di vita del prodotto*. Questo paragone non appare fuori luogo, poiché l'energia nucleare di cui si stanno analizzando i consumi come fonte per la produzione di elettricità ha verosimilmente un proprio ciclo di vita, dipendente, tra le altre cose, dalla disponibilità di uranio. L'utilizzo di energia nucleare nei tre Paesi può essere quindi interpretato come un "prodotto" a ciclo di vita limitato, in quanto in tutti i

<sup>1</sup> I dati sono reperibili nel sito di BP all'indirizzo <http://www.bp.com/statisticalreview>

casi osservati si assiste ad un declino progressivo dei consumi negli ultimi anni. Proprio per questo motivo appare lecito analizzare le serie storiche utilizzando il modello di Bass e quelli da esso derivati, che sono stati descritti precedentemente. L'ipotesi di base che legittima l'uso dei modelli di diffusione in ambito energetico è che le fonti energia primaria possano essere considerate a tutti gli effetti prodotti commerciali che una volta lanciati sul mercato possono essere accettati oppure no, attraverso meccanismi di apprendimento collettivo e passaparola. In particolar modo risulterà piuttosto efficace il modello a potenziale dinamico (Guseo-Guidolin, 2009), nel quale assume un ruolo fondamentale la fase della comunicazione, distinta da quella dell'adozione vera e propria, ma ad essa fortemente legata. Per questo tipo di servizio e per la tecnologia ad esso associata la comunicazione e l'informazione hanno giocato un ruolo importante: si parla in verità anche di errata comunicazione e disinformazione, che hanno favorito il rapido processo di sviluppo dell'energia nucleare. Basti pensare che nelle centrali nucleari tra gli anni Cinquanta e Settanta avvennero molteplici eventi dannosi di cui non venne data al momento dell'accaduto alcuna notizia, facendo passare la via atomica per conveniente e sicura, sebbene all'epoca dei fatti sicuramente non lo fosse. Rendere noti a tutto il mondo i successivi incidenti e gli effettivi rischi, sui quali non era più possibile tacere, ha portato senza dubbio molta sfiducia nei confronti del nucleare e ha modificato inevitabilmente la percezione relativa a questa forma di energia.

I modelli che verranno utilizzati permetteranno quindi di analizzare i dati in modo da comprendere il lancio e la crescita di questo particolare tipo di innovazione (tale era negli anni 60), oltre a prevederne i possibili sviluppi futuri.

## 4.1 Il caso statunitense

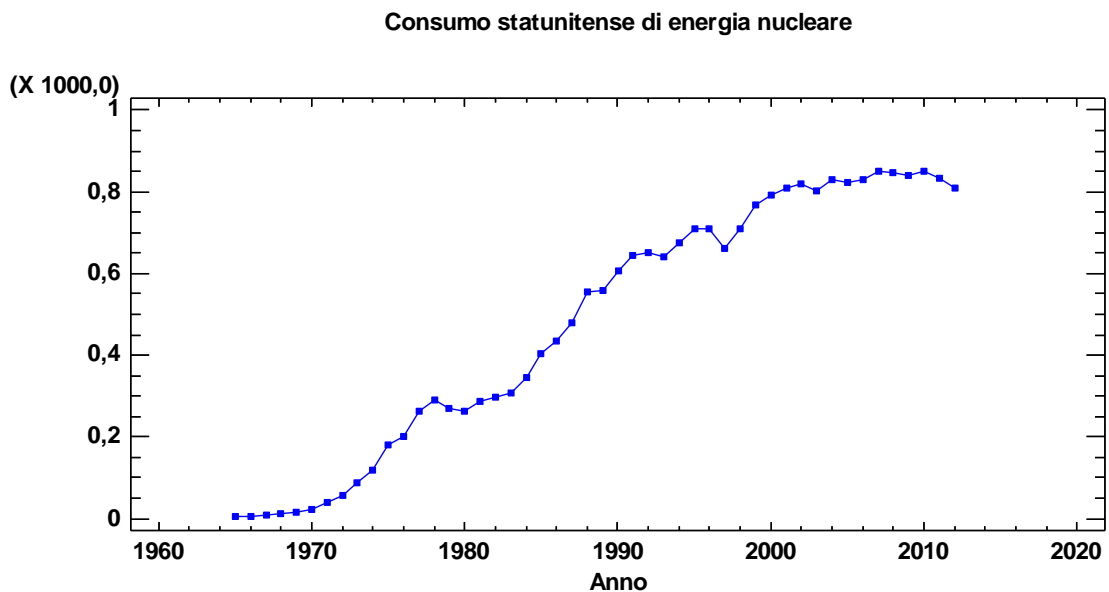


Figura 4.2 - Serie storica dei consumi nucleari negli Stati Uniti

Graficamente si assiste nella fase ascendente del ciclo di vita dei consumi di energia nucleare statunitensi a delle crescite repentine: la prima interrotta nel 1979, e dunque in corrispondenza dell'incidente di Three Mile Island, che aveva interessato proprio gli USA; la seconda, che ha avuto inizio negli anni Ottanta e fine negli anni Novanta; la terza, cominciata alla fine del millennio e a cui è seguito uno stallo, seguito da un declino avvenuto in questi ultimi anni. Considerato l'andamento perturbato di questa serie, il modello di Bass standard non sarà probabilmente il più indicato, ma può essere comunque un buon punto d'inizio per arrivare poi a formulare ipotesi più complesse.

Applicando ai dati cumulati della serie in questione un modello di Bass standard, si ottengono i risultati che seguono:

### **Regressione non lineare - USA nuclear CUM**

Variabile dipendente: USA nuclear CUM

Variabili indipendenti: t

Funzione da stimare:  $m \cdot (1 - \text{EXP}(-(p+q) \cdot t)) / (1 + (q/p) \cdot \text{EXP}(-(p+q) \cdot t))$

Stime dei parametri iniziali:

m = 30000,0

p = 0,001

q = 0,1

Metodo di stima: Marquardt

Stima raggiunta per la convergenza della somma residua dei quadrati.

Numero di iterazioni: 4

Numero di chiamate di funzione: 18

### Risultati della stima

			Intervallo di confidenza al	95,0%
		Errore standard	asintotico	
Parametro	Stima	asintotico	inferiore	superiore
m	30024,6	707,571	28599,4	31449,7
p	0,00156148	0,0000560228	0,00144864	0,00167431
q	0,110911	0,00268128	0,10551	0,116311

### Analisi della varianza

Sorgente	Somma dei quadrati	G.l.	Media dei quadrati
Modello	5,36308E9	3	1,78769E9
Residuo	2,71142E6	45	60253,8
Totale	5,36579E9	48	
Totale (Corr.)	2,56625E9	47	

R-quadrato = 99,8943 percento

R-quadrato (adattato per g.l.) = 99,8896 percento

Errore standard della stima = 245,466

Errore assoluto medio = 201,356

Statistica di Durbin-Watson = 0,0696148

Autocorrelazione residua al lag 1 = 0,934198

### Consumo statunitense di energia nucleare

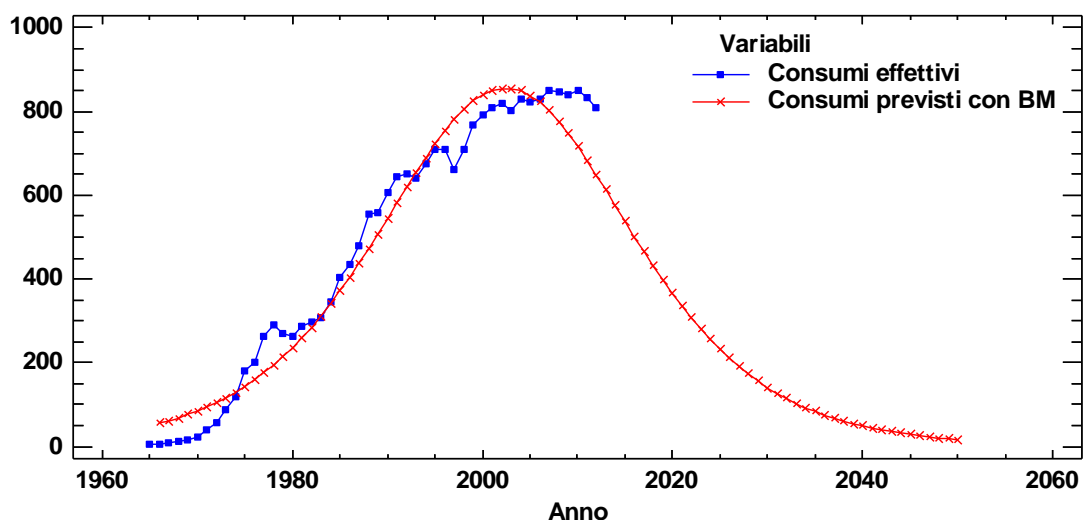


Figura 4.3 – Previsione dei consumi nucleari USA con modello di Bass standard

La bontà di adattamento del modello ai dati ci viene fornita dall'indice di determinazione  $R^2$ , che in questo caso è pari a 0,998943. Ciò significa che, in questa analisi, il BM spiega il 99,8943% della variabilità totale dei dati, valore piuttosto elevato ma migliorabile per questa categoria di modelli, come del resto si può ben notare anche dalla Figura 4.3. Il mercato potenziale, descritto dal parametro  $m$ , è pari a 30025, ma si può immaginare sottostimato in questa prima applicazione. La stima del parametro di innovazione  $p$  è simile al valore ipotizzato inizialmente per esso (0,0016) e quindi rientra nella norma, cosa che si può dire anche per la stima del parametro di imitazione  $q$ , la quale presenta un valore di 0,11.

Dal confronto grafico tra il modello e la serie dei consumi effettivi appare chiaro quanto il metodo di stima utilizzato sia insoddisfacente, in quanto si notano diversi problemi:

1. i dati iniziali vengono sovrastimati;
2. non viene colta la crescita esponenziale dei consumi registrata negli anni '70;
3. viene anticipato il picco massimo;
4. viene forzata la chiusura del ciclo.

Per migliorare queste imprecisioni si può ricorrere al modello con mercato potenziale variabile, che rappresenta un'estensione del modello di Bass standard. Per tale motivo, le stime di quest'ultimo saranno utilizzate come punti di inizializzazione per la stima del modello proposto in alternativa.

L'analisi eseguita con il modello di Guseo-Guidolin porta ai seguenti risultati:

### **Regressione non lineare - USA nuclear CUM**

Variabile dipendente: USA nuclear CUM

Variabili indipendenti: t

Funzione da stimare:  $K * \left( \frac{1 - \text{EXP}(-(pc+qc)*t)}{1 + (qc/pc)*\text{EXP}(-(pc+qc)*t)} \right)^{1/2} * (1 - \text{EXP}(-(ps+qs)*t) / (1 + (qs/ps)*\text{EXP}(-(ps+qs)*t)))$

Stime dei parametri iniziali:

K = 30025,0

pc = 0,001

qc = 0,01

ps = 0,00156

qs = 0,11

Metodo di stima: Marquardt

Stima raggiunta per la convergenza della somma residua dei quadrati.

Numero di iterazioni: 121

Numero di chiamate di funzione: 846

### Risultati della stima

			Intervallo di confidenza al	95,0%
		Errore standard	asintotico	
Parametro	Stima	asintotico	inferiore	superiore
K	35906,1	2233,83	31401,2	40411,1
pc	0,000347482	0,0000503888	0,000245863	0,0004491
qc	0,113947	0,00808627	0,0976395	0,130255
ps	0,00944846	0,000657663	0,00812216	0,0107748
qs	0,137625	0,00910728	0,119258	0,155991

### Analisi della varianza

Sorgente	Somma dei quadrati	G.l.	Media dei quadrati
Modello	5,36557E9	5	1,07311E9
Residuo	225441,	43	5242,82
Totale	5,36579E9	48	
Totale (Corr.)	2,56625E9	47	

R-quadrato = 99,9912 percento  
R-quadrato (adattato per g.l.) = 99,9904 percento  
Errore standard della stima = 72,4073  
Errore assoluto medio = 51,2505  
Statistica di Durbin-Watson = 0,192415  
Autocorrelazione residua al lag 1 = 0,903654

Il modello con mercato potenziale variabile permette di spiegare il 99,9912% della variabilità, valore piuttosto alto considerando che utilizza solamente cinque parametri. Il miglioramento rispetto al precedente Bass standard è palese. Il mercato potenziale  $K$  è aumentato leggermente, raggiungendo il valore di 35906, mentre i parametri di imitazione nella comunicazione e nei consumi, rispettivamente  $qc$  e  $qs$ , sono entrambi nella norma (0,11 e 0,14 rispettivamente). Per quanto riguarda  $ps$ , che rappresenta la componente innovativa nei consumi, assume un valore standard se non leggermente elevato (stima pari a 0,0094), mentre il parametro relativo all'innovazione nella comunicazione, ovvero  $pc$ , è inferiore a quanto ipotizzato (0,00035), elemento chiarificatore del fatto che nel consumo di energia nucleare la parte innovativa della comunicazione non ha avuto un effetto preponderante.



### Consumo statunitense di energia nucleare

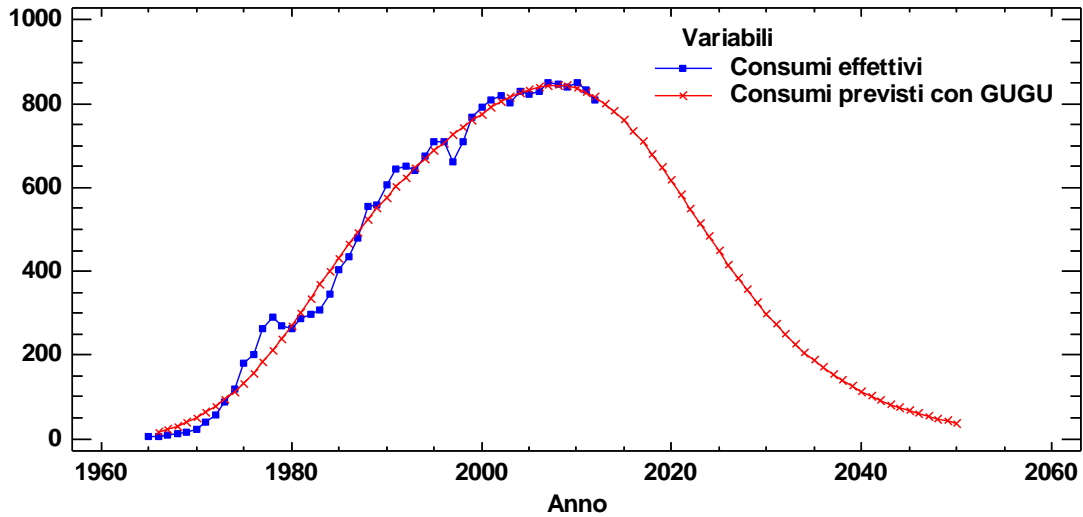


Figura 4.4 - Previsione dei consumi nucleari USA con modello di Guseo-Guidolin

Dal punto di vista grafico (Figura 4.4), si nota subito quanto il modello sia ben adattabile alla seconda parte della serie e sembri anche cogliere esattamente il progressivo declino degli ultimi anni, mentre la prima parte della serie non risulta ancora descritta un modo del tutto soddisfacente. Infatti il modello di Guseo-Guidolin non riesce a rilevare perfettamente l'improvviso aumento dei consumi avvenuto all'inizio degli anni Settanta.

Niente vieta di introdurre quindi nel modello in questione uno shock esponenziale, nella parte relativa alla fase di adozione, ovvero ai consumi veri e propri. Quello che si vuole verificare è se l'inserimento di una perturbazione esterna al processo migliori effettivamente la bontà di adattamento ai dati.

Ipotizzare un modello con mercato potenziale variabile e uno shock conduce a questi risultati:

#### **Regressione non lineare - USA nuclear CUM**

Variabile dipendente: USA nuclear CUM

Variabili indipendenti: t

Funzione da stimare:  $K * \left( \frac{1 - \exp(-(pc+qc)*t)}{1 + (qc/pc) * \exp(-(pc+qc)*t)} \right)^{1/2} * (1 - \exp(-(ps+qs)*(t+(c1/b1)*(EXP(b1*(t-a1))-1)*(a1 \leq t)))) / (1 + (qs/ps) * \exp(-(ps+qs)*(t+(c1/b1)*(EXP(b1*(t-a1))-1)*(a1 \leq t))))$

Stime dei parametri iniziali:

K = 35906,0

$p_c = 0,0003$   
 $q_c = 0,11$   
 $p_s = 0,009$   
 $q_s = 0,138$   
 $c_1 = 0,5$   
 $b_1 = -0,1$   
 $a_1 = 7,0$

Metodo di stima: Marquardt

Stima raggiunta per la convergenza della somma residua dei quadrati.

Numero di iterazioni: 85

Numero di chiamate di funzione: 849

### Risultati della stima

			Intervallo di confidenza al 95,0%	
		Errore standard	Asintotico	
Parametro	Stima	Asintotico	Inferiore	superiore
K	43949,6	5357,6	33121,5	54777,8
$p_c$	0,000521136	0,0000619951	0,000395839	0,000646433
$q_c$	0,0889939	0,0110884	0,0665834	0,111404
$p_s$	0,00366602	0,000691014	0,00226942	0,00506261
$q_s$	0,122473	0,00560724	0,11114	0,133806
$c_1$	4,10394	1,16292	1,75358	6,45429
$b_1$	-0,692193	0,200147	-1,09671	-0,28768
$a_1$	9,61974	0,360298	8,89154	10,3479

### Analisi della varianza

Sorgente	Somma dei quadrati	G.l.	Media dei quadrati
Modello	5,36572E9	8	6,70715E8
Residuo	72824,8	40	1820,62
Totale	5,36579E9	48	
Totale (Corr.)	2,56625E9	47	

R-quadrato = 99,9972 percento

R-quadrato (adattato per g.l.) = 99,9967 percento

Errore standard della stima = 42,6687

Errore assoluto medio = 31,2787

Statistica di Durbin-Watson = 0,426341

Autocorrelazione residua al lag 1 = 0,781714

### Consumo statunitense di energia nucleare

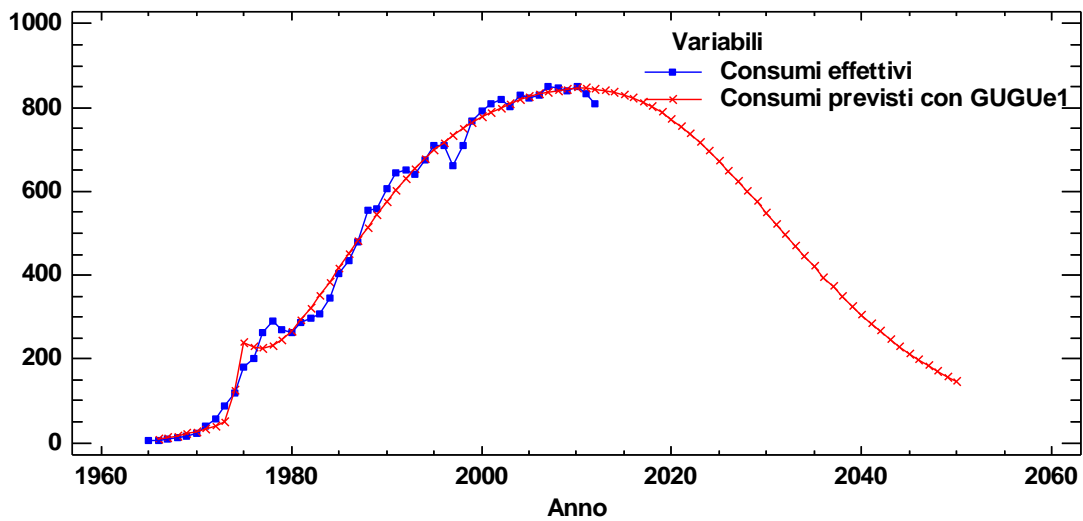


Figura 4.5 - Previsione dei consumi nucleari USA con modello di Guseo-Guidolin + 1 shock esponenziale

L'indice della bontà di adattamento del modello è pari a 0,999972, valore naturalmente più elevato rispetto alla formulazione senza shock.

Poiché questo modello e quello precedentemente descritto sono nidificati, è possibile utilizzare un semplice indice che fornisce indicazioni riguardo al miglioramento ottenuto, in termini di riduzione della devianza residua, passando dal modello ridotto a quello più esteso. Il rapporto di correlazione multipla al quadrato, in questo esempio, può essere formulato nel seguente modo:

$$P^2 = \frac{R_{GUGUe1}^2 - R_{GUGU}^2}{1 - R_{GUGU}^2}. \quad (4.1)$$

L'indice (4.1) può assumere valori che vanno da 0 a 1 e sarà tanto più elevato quanto maggiore sarà il guadagno che si ottiene passando da un modello più semplice ad uno più complesso. Valori di  $P^2$  superiori a 0,3 indicano un miglioramento che può ampiamente motivare l'utilizzo del modello con più parametri.

Il calcolo dell'indice (4.1) in questo caso è:

$$P^2 = \frac{R_{GUGUe1}^2 - R_{GUGU}^2}{1 - R_{GUGU}^2} = \frac{0,999972 - 0,999912}{1 - 0,999912} = 0,6818$$

Questo risultato fa propendere senza dubbio per la scelta del modello dotato di shock esponenziale e conferma la significatività di quest'ultimo.

La stima del mercato  $K$ , pari a 43950, è aumentata sensibilmente, anche se dalla figura 4.5 si può ben capire come il modello ritardi la chiusura del ciclo, a causa della perturbazione inserita. Il parametro  $pc$  risulta moderatamente aumentato, mentre  $qc$ ,  $ps$  e  $qs$  sono leggermente diminuiti, anche se tutte queste variazioni sono modeste.

Lo shock evidenzia una notevole intensità, data da  $c1$  che è pari a 4,10, un tempo di riassorbimento rapido ( $b1$  è circa -0,69) ed ha avuto inizio nel 1973 ( $a1$  è pari a 9,62).

Non a caso il 1973 è proprio l'anno della crisi petrolifera, che ha portato gli Stati Uniti, come molti altri paesi nel mondo, a ricercare delle fonti energetiche alternative al petrolio: è verosimilmente dovuto a questo il considerevole aumento dei consumi di energia nucleare avvenuto proprio a partire da quell'anno.

Anche questo modello presenta dei problemi, per esempio anticipa il picco locale avvenuto nel 1978 e il calo di consumi dell'anno seguente, ma risulta nel complesso abbastanza esauriente. Il miglioramento sia da un punto di vista descrittivo che previsivo rispetto al modello di Bass standard è notevole, come è possibile notare anche dal confronto grafico in Figura 4.6.

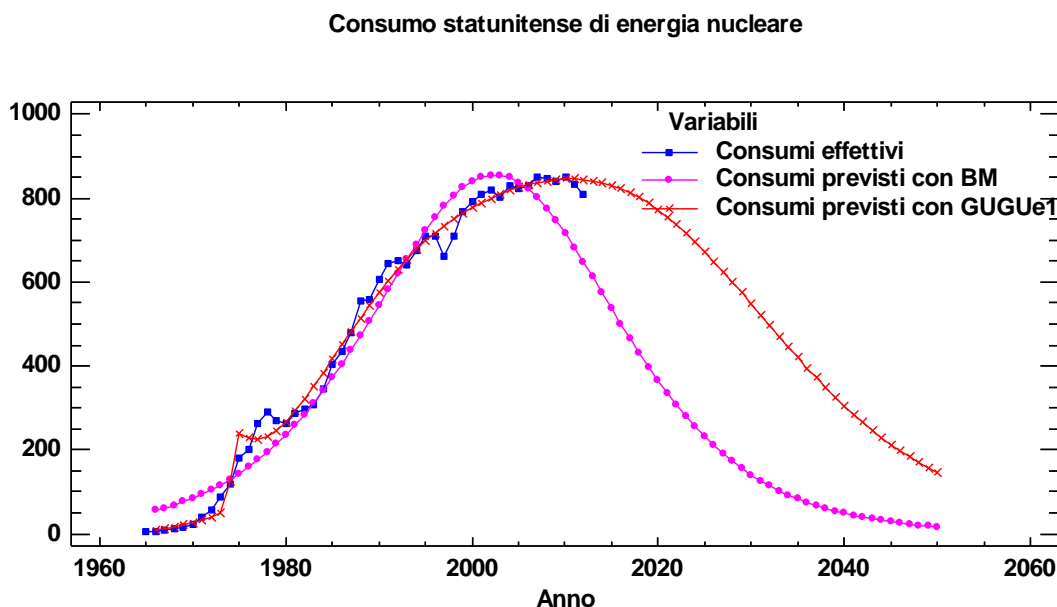


Figura 4.6 - Confronto tra previsioni con modello di Bass standard e di Guseo-Guidolin con shock esponenziale

L'analisi dei residui del modello di Guseo-Guidolin con impulso esponenziale, condotta tramite il test di Durbin-Watson, rivela che essi sono correlati. Un valore della statistica test di 0,43 segnala infatti un'autocorrelazione positiva, che è possibile ridurre

applicando alla parte residuale un modello di tipo ARMAX, seguendo l'impostazione presentata nella sezione 2.3. In questo caso un buon risultato si può ottenere attraverso un processo ARMAX(6,2), che conduce alle seguenti previsioni:

### **Previsione - USA nuclear CUM**

Variabile: USA nuclear CUM

Numero di osservazioni = 48

Indice iniziale = 1,0

Intervallo di campionamento = 1,0

### **Sintesi della previsione**

Modello di previsione selezionato: ARIMA(6,0,2) con costante + 1 regressore

Numero di previsioni generate: 12

Numero di periodi trattenuti per convalida: 0

### **Sintesi del modello ARIMA**

<i>Parametro</i>	<i>Stima</i>	<i>Errore std.</i>	<i>t</i>	<i>P-value</i>
AR(1)	0,513763	0,15047	3,41439	0,001534
AR(2)	-0,627267	0,170117	-3,68728	0,000706
AR(3)	0,766022	0,173364	4,41857	0,000080
AR(4)	-0,775057	0,169707	-4,56703	0,000051
AR(5)	0,345153	0,169675	2,0342	0,048955
AR(6)	-0,470949	0,15303	-3,07749	0,003862
MA(1)	-1,02368	0,0567326	-18,0439	0,000000
MA(2)	-0,946547	0,063229	-14,9701	0,000000
PRED_usagugue1	0,999656	0,000879295	1136,88	0,000000
Media	2,54521	8,95395	0,284255	0,777758
Costante	3,17728			

Previsione storica: sì

Varianza stimata di rumore bianco = 294,799 con 38 gradi di libertà

Deviazione standard stimata di rumore bianco = 17,1697

Numero di iterazioni: 18

Dai risultati ottenuti si può notare che tutte le stime dei parametri, sia per la parte a media mobile sia per quella autoregressiva, sono significativamente diverse da 0 ad un livello di confidenza del 95%. Anche il parametro associato al regressore esterno (in questo caso il modello Guseo-Guidolin con shock esponenziale) è fortemente significativo ed assume valore quasi unitario, a indicare quindi un'ottima centratura della struttura nonlineare selezionata.

Il correlogramma in Figura 4.7 mostra che l'autocorrelazione dei residui è ora statisticamente pari a zero ad ogni ritardo.

Autocorrelazioni dei residui per adattate USA nuclear CUM  
ARIMA(6,0,2) con costante + 1 regressore

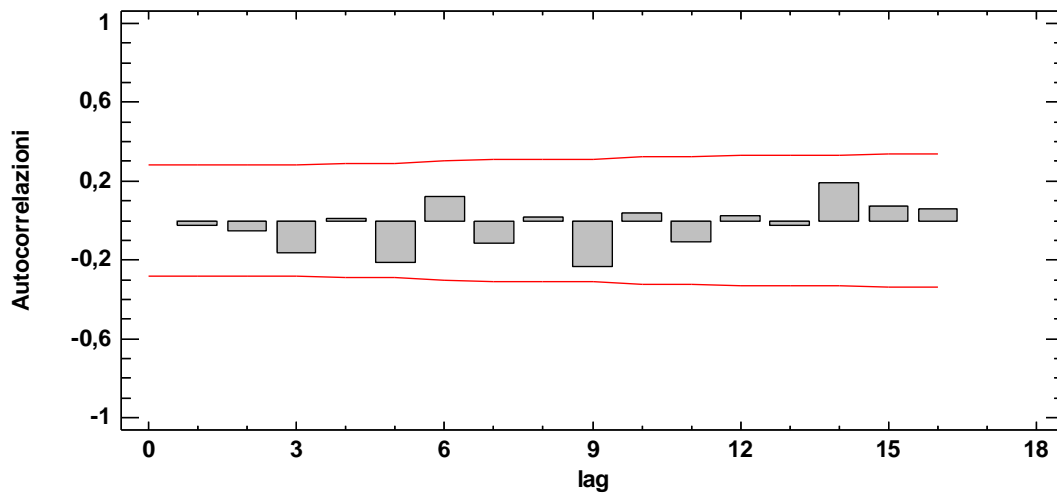


Figura 4.7 - Correlogramma della serie dei residui modellata con un ARMAX(6,2)

In Figura 4.8 viene invece mostrato il risultato finale per quanto riguarda la modellazione della serie dei consumi di energia nucleare per gli Stati Uniti, su cui è stato prima applicato il modello di Guseo-Guidolin con un impulso esponenziale e poi un modello ARMAX(6,2) sui residui.

Consumo statunitense di energia nucleare

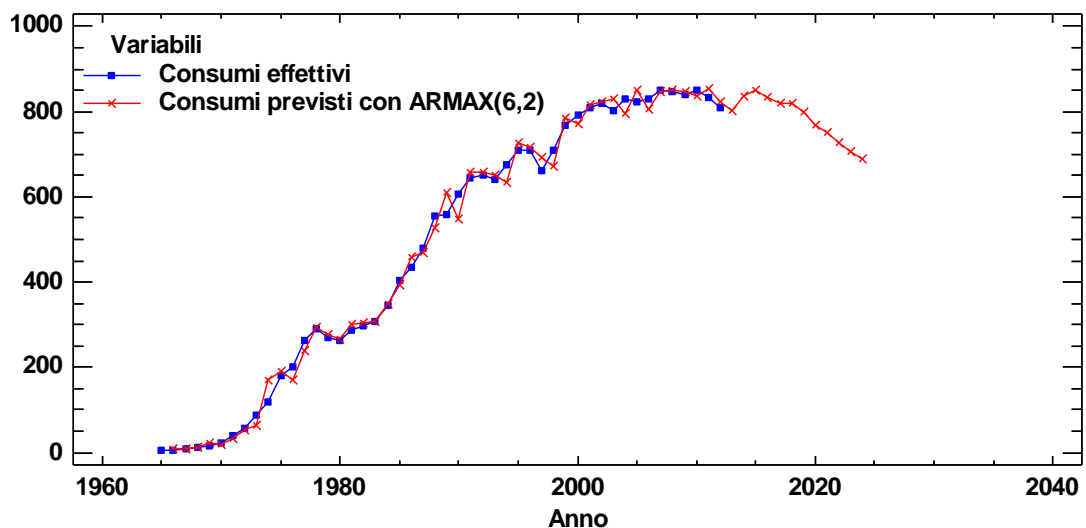


Figura 4.8 - Previsione dei consumi nucleari USA con modello di Guseo-Guidolin e uno shock esponenziale + modello ARMAX(6,2) applicato alla parte residuale

Andando ad osservare come gli incidenti nucleari hanno influenzato i consumi statunitensi nel corso degli anni, si nota una diminuzione modesta dovuta all'incidente del 1979 avvenuto a Three Mile Island, come era già stato detto in precedenza. L'evento ha suscitato solamente un temporaneo rallentamento, seguito negli anni immediatamente successivi da una crescita talmente forte da non essere frenata neppure da un disastro come quello di Černobyl'.

Negli ultimi anni si è assistito infine ad una stasi del processo. La causa di questo non è però attribuibile solamente al recente incidente avvenuto a Fukushima, ma anche ad altri fattori, come la costruzione di nuovi impianti, che diventa sempre più costosa e quindi svantaggiosa. Come si può infatti notare dalla serie storica, il periodo di stagnazione è cominciato già all'inizio del nuovo millennio, mentre la fase calante sembra cominciare circa nel 2008, cosa che fa supporre che tutto ciò sarebbe probabilmente successo indipendentemente dall'avvenuta del disastro giapponese.

## 4.2 Il caso francese

Consumo francese di energia nucleare

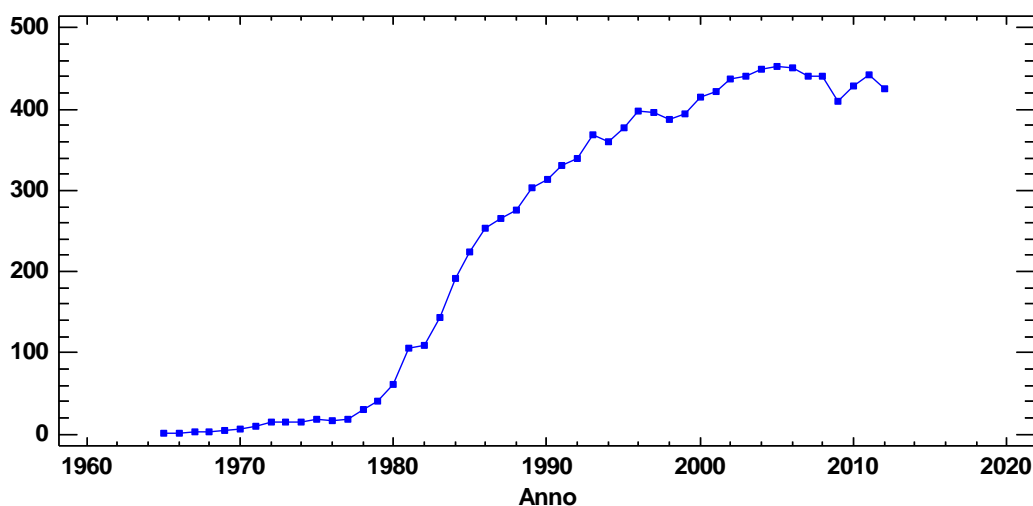


Figura 4.9 - Serie storica dei consumi nucleari in Francia

Da un'analisi puramente grafica (Figura 4.9) è evidente come l'energia nucleare non sia stata una risorsa fondamentale per la politica energetica francese in un primo momento. Questo probabilmente ha in parte a che vedere con un'iniziale lentezza nel parallelo processo di costruzione dei reattori nucleari. Ad un improvviso cambio di direzione si assiste poi agli inizi degli anni Ottanta, quando i consumi crescono tanto da

far diventare il Paese, in un tempo relativamente breve, fortemente dipendente da questa fonte di energia. La Francia è, in effetti, il paese europeo che più ha investito sull'opzione nucleare.

Anche in questo caso il modello con mercato potenziale dinamico viene inizializzato a partire dalla stima di un modello Bass standard adattato alla serie dei consumi nucleari francesi. Il modello di Guseo-Guidolin porta ai risultati che vengono qui di seguito riportati:

### **Regressione non lineare - France nuclear CUM**

Variabile dipendente: France nuclear CUM

Variabili indipendenti: t

Funzione da stimare:  $K * (((1 - \text{EXP}(-(pc+qc)*t)) / (1 + (qc/pc) * \text{EXP}(-(pc+qc)*t)))^{1/2}) * (1 - \text{EXP}(-(ps+qs)*t)) / (1 + (qs/ps) * \text{EXP}(-(ps+qs)*t))$

Stime dei parametri iniziali:

K = 13363,0

pc = 0,001

qc = 0,01

ps = 0,00073

qs = 0,1427

Metodo di stima: Marquardt

Stima raggiunta per la convergenza delle stime dei parametri.

Numero di iterazioni: 70

Numero di chiamate di funzione: 485

### **Risultati della stima**

			<i>Intervallo di confidenza al</i>	<i>95,0%</i>
		<i>Errore standard</i>	<i>asintotico</i>	
<i>Parametro</i>	<i>Stima</i>	<i>Asintotico</i>	<i>inferiore</i>	<i>superiore</i>
K	15656,2	182,323	15288,5	16023,9
pc	0,000153814	0,00000590909	0,000141897	0,000165731
qc	0,145446	0,00195167	0,14151	0,149382
ps	0,000958117	0,0000613909	0,00083431	0,00108192
qs	0,256308	0,00467606	0,246878	0,265739

### **Analisi della varianza**

<i>Sorgente</i>	<i>Somma dei quadrati</i>	<i>G.l.</i>	<i>Media dei quadrati</i>
Modello	1,2426E9	5	2,4852E8
Residuo	13217,9	43	307,392
Totale	1,24261E9	48	
Totale (Corr.)	6,62383E8	47	

R-quadrato = 99,998 percento



R-quadrato (adattato per g.l.) = 99,9978 percento  
 Errore standard della stima = 17,5326  
 Errore assoluto medio = 13,3376  
 Statistica di Durbin-Watson = 0,418273  
 Autocorrelazione residua al lag 1 = 0,766295

Consumo francese di energia nucleare

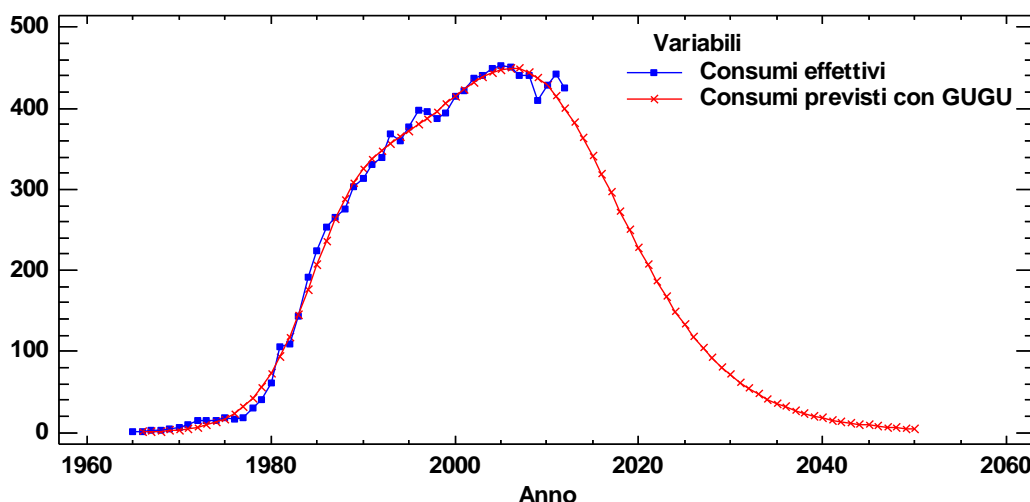


Figura 4.10 - Previsione dei consumi nucleari in Francia con modello di Guseo-Guidolin

Dall'analisi appena condotta risulta che il modello con mercato potenziale variabile spiega il 99,998% della variabilità totale, quindi il livello di adattamento è piuttosto soddisfacente. Il mercato potenziale, espresso dal parametro  $K$ , è pari a 15656. Secondo le previsioni di questo modello, quindi, i consumi di energia nucleare del Paese dovrebbero quasi estinguersi nel 2050 (Figura 4.10). Tale evento è plausibile poiché il Governo francese ha optato per una forte diminuzione della dipendenza dal nucleare in un prossimo futuro, anche se bisogna osservare che il modello prevede una "chiusura" del ciclo forse più rapida di quanto non sarà effettivamente. Si notino a tal proposito gli ultimi dati osservati nella serie.

Il parametro di innovazione nella fase di comunicazione,  $pc$ , è inferiore a quanto ipotizzato (la sua stima è 0,00015), mentre la stima di  $qc$ , pari a 0,15, non presenta caratteristiche sorprendenti. Osservando la parte del processo relativa all'adozione, si nota un parametro  $ps$  nella norma (assume un valore di 0,00096), mentre il parametro  $qs$  pari a 0,26 appare piuttosto elevato: quindi la componente imitativa, sia in fase di comunicazione sia soprattutto nella fase di adozione, ha giocato un ruolo fondamentale nella diffusione del nucleare in Francia.

### Consumo francese di energia nucleare

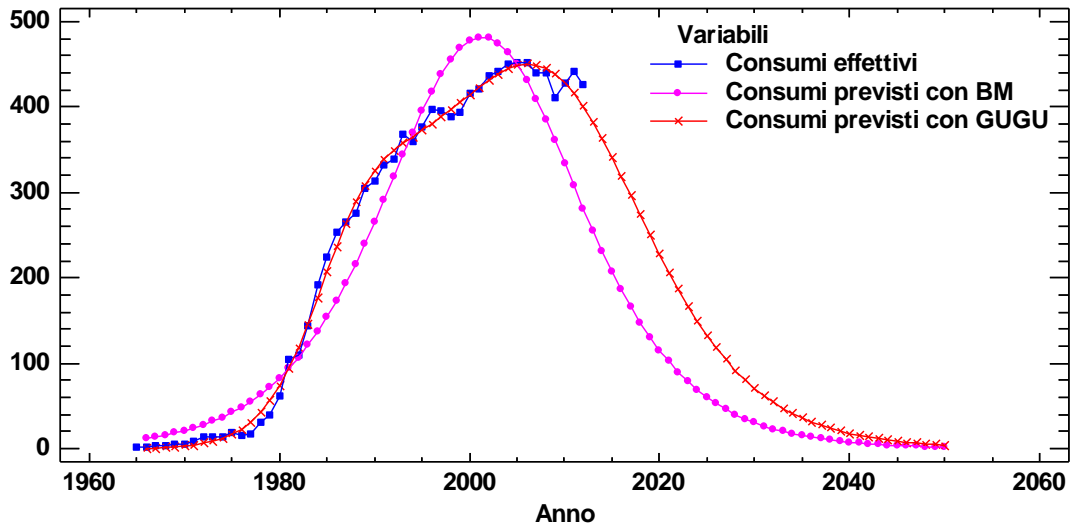


Figura 4.11 - Confronto tra previsioni con modello di Bass standard e di Guseo-Guidolin

Anche in questo caso i residui derivanti dal modello presentano autocorrelazione positiva, in quanto la statistica test di Durbin-Watson ha un valore di 0,42. Per tale motivo, come visto in precedenza, si opterà per l'applicazione di un modello autoregressivo a media mobile con regressore esterno ARMAX(4,5).

I risultati sono i seguenti:

#### **Previsione - France nuclear CUM**

Variabile: France nuclear CUM

Numero di osservazioni = 48

Indice iniziale = 1,0

Intervallo di campionamento = 1,0

#### **Sintesi della previsione**

Modello di previsione selezionato: ARIMA(4,0,5) con costante + 1 regressore

Numero di previsioni generate: 12

Numero di periodi trattenuti per convalida: 0

#### **Sintesi del modello ARIMA**

Parametro	Stima	Errore std.	t	P-value
AR(1)	0,489525	0,187526	2,61043	0,012980
AR(2)	-0,186139	0,0898092	-2,0726	0,045230
AR(3)	0,868482	0,097845	8,8761	0,000000
AR(4)	-0,634118	0,195854	-3,23771	0,002545
MA(1)	-0,636899	0,193931	-3,28415	0,002242

MA(2)	-0,330566	0,152109	-2,17322	0,036239
MA(3)	1,0875	0,0833183	13,0523	0,000000
MA(4)	0,800204	0,216604	3,69431	0,000709
MA(5)	0,486763	0,20434	2,38213	0,022466
PRED_frgugu	0,999275	0,000419562	2381,71	0,000000
Media	5,36288	2,61831	2,04822	0,047684
Costante	2,47899			

Previsione storica: sì

Varianza stimata di rumore bianco = 66,5193 con 37 gradi di libertà

Deviazione standard stimata di rumore bianco = 8,15593

Numero di iterazioni: 31

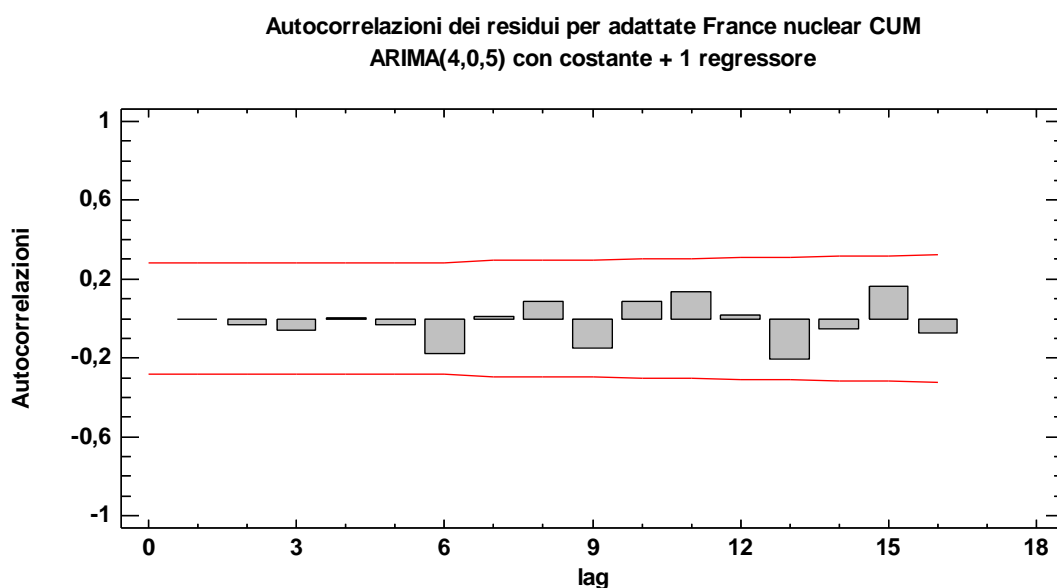


Figura 4.12 - Correlogramma della serie dei residui modellata con un ARMAX(4,5)

I parametri del modello, anche quello associato alla funzione esterna, sono tutti significativi, cosa deducibile dai valori dei p-value associati ai t-test sui parametri, che sono inferiori a 0,05. Un ulteriore indice dell'adeguatezza del modello ARMAX(4,5) per questo particolare caso è fornito dal correlogramma dei residui, che dimostra come la correlazione sia significativamente pari a zero per tutti i ritardi.

In Figura 4.13 vengono mostrate le previsioni ottenute applicando alla serie dei consumi nucleari francesi i due modelli sopra analizzati.

Come per il caso degli Usa, anche per la Francia non si può dire che gli incidenti nucleari abbiano influito da subito in maniera rilevante sui consumi che si stanno analizzando. Nel 1979 si assiste persino ad un incremento non indifferente dei consumi stessi, cosa prevedibile visti i modesti danni esclusivamente locali che l'incidente americano ha provocato in quell'anno.

### Consumo francese di energia nucleare

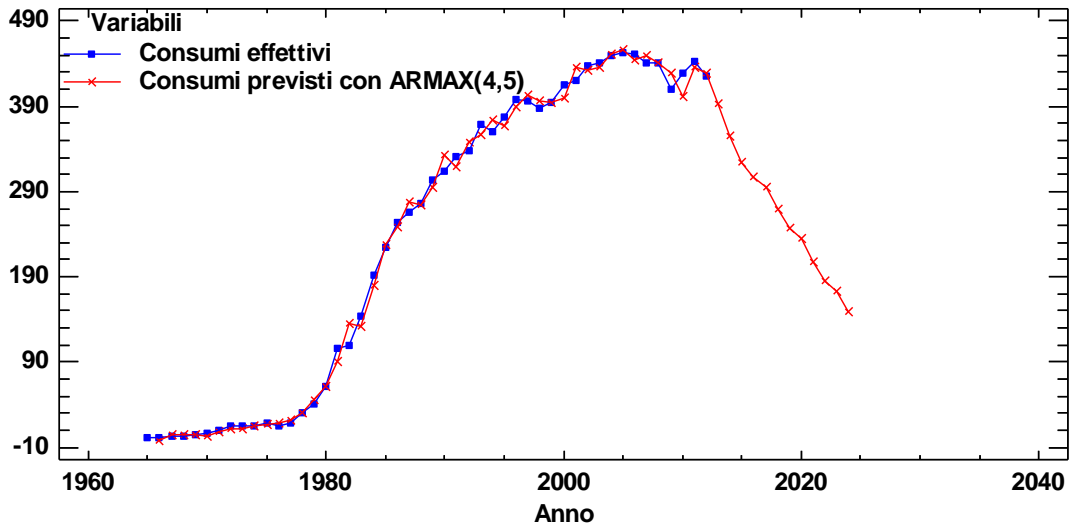


Figura 4.13 - Previsione dei consumi nucleari francesi con modello di Guseo-Guidolin + modello ARMAX(4,5) applicato alla parte residuale

Il disastro ucraino del 1986 ha comportato, almeno in un primo momento, solo una riduzione progressiva, ma non un arresto, dell'aumento esponenziale nei consumi nazionali che si stava verificando negli anni precedenti. Negli ultimi tempi, in Francia, la tecnologia nucleare sembra aver trovato il suo culmine, per poi entrare in una fase di declino che, con qualche eccezione, parrebbe perdurare. L'attuale calo nei consumi nucleari potrebbe essere imputato a differenti ragioni, come per esempio proprio all'incidente di Černobyl': sebbene sia avvenuto più di 27 anni fa, il fatto che se ne continui a discutere e se ne subiscano ancora in parte gli effetti potrebbe aver contribuito ad un inevitabile cambio di rotta, anche se con un certo ritardo. Come nel caso statunitense, anche per la Francia il disastro di Fukushima sarebbe, secondo questa ipotesi, solo un catalizzatore per il processo discendente che sta interessando il nucleare, senza esserne in realtà l'evento scatenante.

D'altro canto bisogna tenere conto del fatto che l'energia nucleare dipende dalla disponibilità di una risorsa piuttosto limitata, l'uranio, e dalla costruzione di centrali nucleari. E' noto che le centrali nucleari attualmente in funzione hanno un'età media che supera i 20 anni, mentre la costruzione di nuovi impianti è sostanzialmente ferma. Si vedano a tal proposito le previsioni formulate in Guidolin e Guseo (2012).

## 4.3 Il caso tedesco

La serie storica relativa ai consumi di energia nucleare in Germania è, tra le tre analizzate, quella più irregolare, poiché ha visto susseguirsi aumenti e cali anno dopo anno, in particolar modo a seguito del 1986. Ciò conferma la costante insicurezza che il Paese nutriva verso tale fonte energetica. Anche se la decisione di rinunciare definitivamente al nucleare è stata presa a seguito dei fatti di Fukushima, si può notare in Figura 4.14 come i consumi siano stazionari e poi in calo già dagli inizi del Duemila.

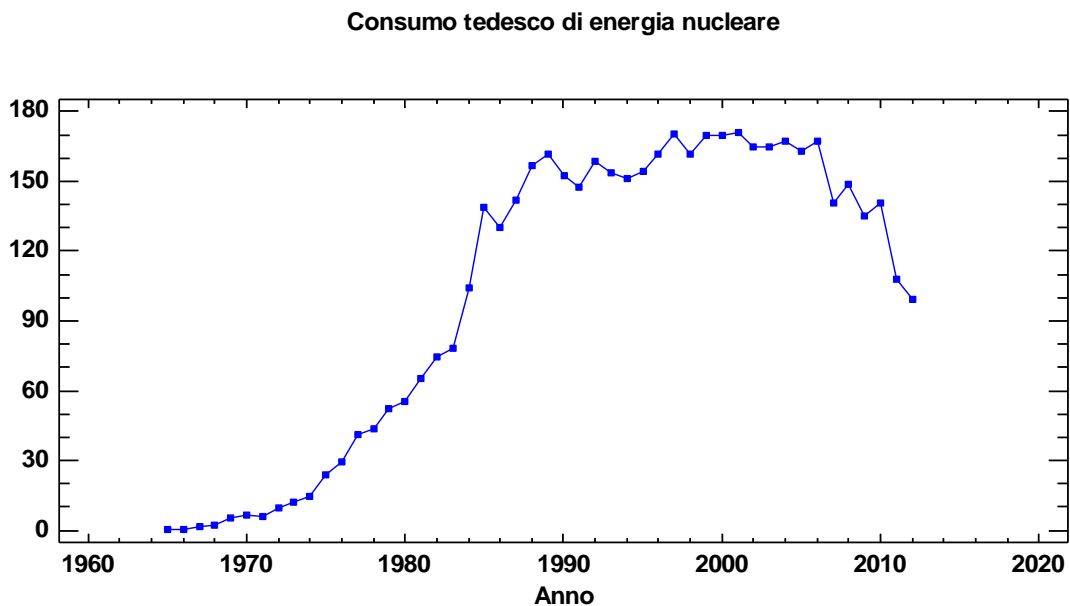


Figura 4.14 - Serie storica dei consumi nucleari in Germania

Anche per questi dati risulta conveniente l'utilizzo del modello di Guseo-Guidolin, a cui si è giunti ponendo sempre come input iniziali le stime del Bass standard. Il modello con mercato variabile conduce a questo esito:

### **Regressione non lineare - Germany nuclear CUM**

Variabile dipendente: Germany nuclear CUM

Variabili indipendenti: t

Funzione da stimare:  $K * \left( \frac{1 - \text{EXP}(-(pc+qc)*t)}{1 + (qc/pc)*\text{EXP}(-(pc+qc)*t)} \right)^{1/2} * (1 - \text{EXP}(-(ps+qs)*t)) / (1 + (qs/ps)*\text{EXP}(-(ps+qs)*t))$

Stime dei parametri iniziali:

K = 5446,0

pc = 0,001

qc = 0,1

ps = 0,00136

qs = 0,136

Metodo di stima: Marquardt  
 Stima raggiunta per la convergenza delle stime dei parametri.  
 Numero di iterazioni: 13  
 Numero di chiamate di funzione: 86

### Risultati della stima

			Intervallo di confidenza al	95,0%
		Errore standard	asintotico	
Parametro	Stima	asintotico	inferiore	Superiore
K	6047,97	76,2123	5894,28	6201,67
pc	0,000415443	0,0000312727	0,000352375	0,00047851
qc	0,133646	0,00338979	0,12681	0,140482
ps	0,00292591	0,000199677	0,00252323	0,0033286
qs	0,22346	0,00693636	0,209471	0,237448

### Analisi della varianza

Sorgente	Somma dei quadrati	G.l.	Media dei quadrati
Modello	2,76075E8	5	5,52149E7
Residuo	6694,07	43	155,676
Totale	2,76081E8	48	
Totale (Corr.)	1,31362E8	47	

R-quadrato = 99,9949 percento  
 R-quadrato (adattato per g.l.) = 99,9944 percento  
 Errore standard della stima = 12,477  
 Errore assoluto medio = 9,07232  
 Statistica di Durbin-Watson = 0,433514  
 Autocorrelazione residua al lag 1 = 0,74614

Consumo tedesco di energia nucleare

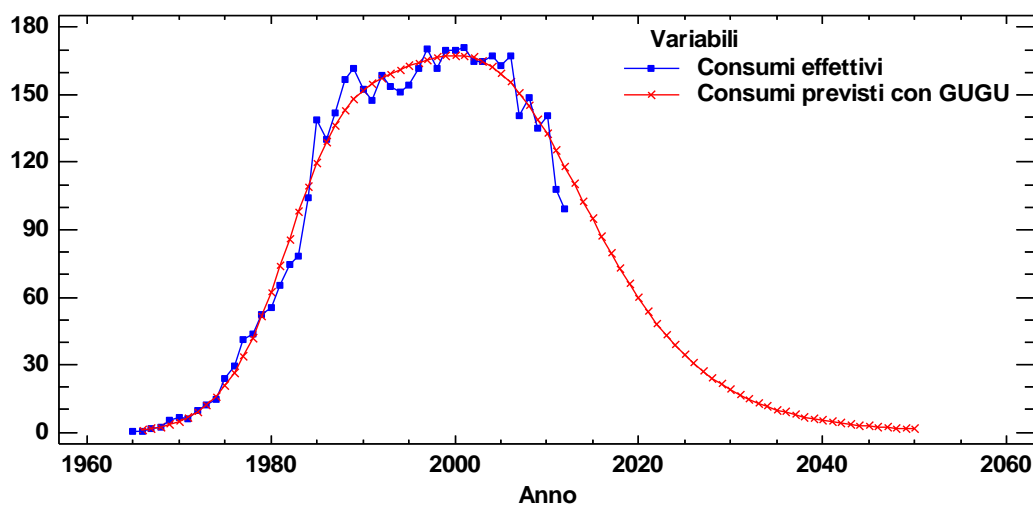


Figura 4.15 - Previsione dei consumi nucleari in Germania con modello Guseo-Guidolin

Con il suddetto modello, viene spiegato il 99,9949% della variabilità totale. Il mercato potenziale variabile, specificato dal parametro  $k$ , è pari a 6048 e sovrastima l'effettivo consumo nucleare (Figura 4.15). Ciò avviene proprio perché non si hanno dati a sufficienza per permettere al modello di comprendere pienamente le scelte compiute dal Governo tedesco negli ultimi anni e quindi di constatare il drastico distacco che si sta creando da questa forma di energia.

Per quanto riguarda il processo di comunicazione, si segnalano una componente imitativa standard ( $qc$  è stimato a 0,13) e una innovativa leggermente inferiore a quanto ci si aspetterebbe normalmente ( $pc$  pari a 0,00042). La fase del consumo è caratterizzata da un valore nella norma per la parte d'innovazione ( $ps$  è 0,0029), mentre presenta una stima piuttosto elevata per quanto concerne la componente d'imitazione ( $qs$  è pari a 0,22).

Consumo tedesco di energia nucleare

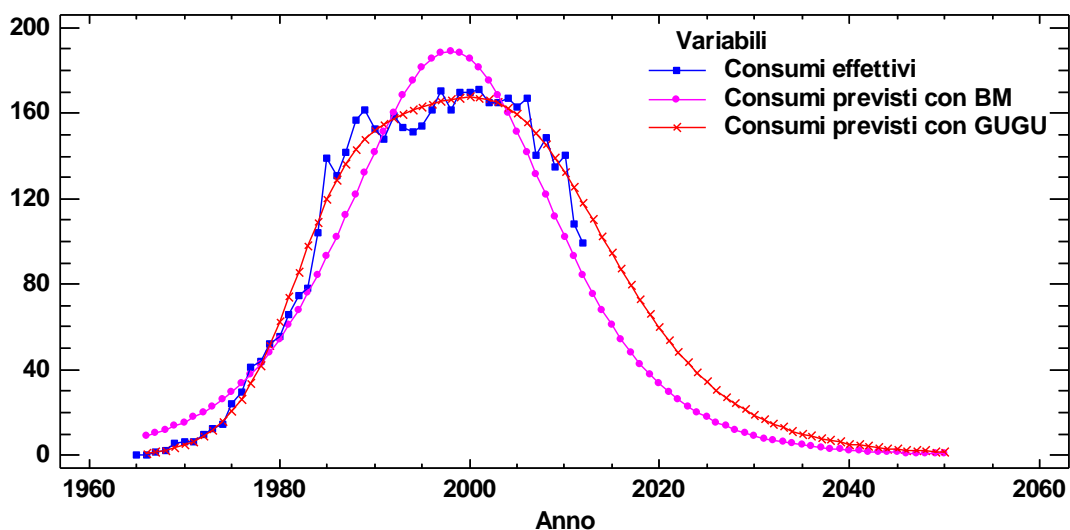


Figura 4.16 - Confronto tra previsioni con modello di Bass standard e di Guseo-Guidolin

Anche per la Germania, la statistica di Durbin-Watson rivela un'autocorrelazione positiva tra i residui del modello Guseo-Guidolin. Per questo motivo si è scelto di introdurre un ARMAX(3,4):

**Previsione - Germany nuclear CUM**

Variabile: Germany nuclear CUM

Numero di osservazioni = 48

Indice iniziale = 1,0

Intervallo di campionamento = 1,0

### Sintesi della previsione

Modello di previsione selezionato: ARIMA(3,0,4) con costante + 1 regressore

Numero di previsioni generate: 12

Numero di periodi trattenuti per convalida: 0

### Sintesi del modello ARIMA

Parametro	Stima	Errore std.	t	P-value
AR(1)	0,40232	0,20152	1,99642	0,052903
AR(2)	0,720057	0,212081	3,3952	0,001588
AR(3)	-0,599992	0,229221	-2,61753	0,012542
MA(1)	-0,761764	0,224921	-3,38681	0,001626
MA(2)	0,509407	0,157064	3,24331	0,002425
MA(3)	0,638539	0,199853	3,19504	0,002768
MA(4)	0,449568	0,184591	2,43549	0,019545
PRED_gergugu	0,998815	0,000649333	1538,22	0,000000
Media	2,29548	1,22655	1,87149	0,068792
Costante	1,09635			

Previsione storica: sì

Varianza stimata di rumore bianco = 39,3801 con 39 gradi di libertà

Deviazione standard stimata di rumore bianco = 6,27536

Numero di iterazioni: 27

Autocorrelazioni dei residui per adattate Germany nuclear CUM  
ARIMA(3,0,4) con costante + 1 regressore

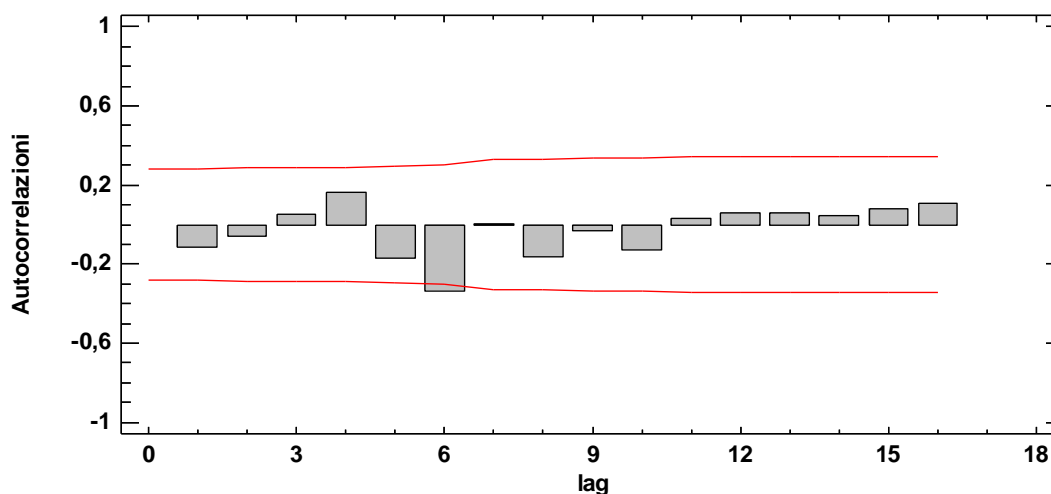


Figura 4.17 - Correlogramma della serie dei residui modellata con un ARMAX(3,4)

Fatta eccezione per il parametro relativo ad AR(1), che comunque presenta un p-value borderline, tutti i parametri del modello sono significativi al 95%. Il correlogramma in Figura 4.17 segnala l'assenza di autocorrelazione residuale per quasi tutti i ritardi.



Anche la modellazione di questa serie storica può essere ritenuta soddisfacente (si veda la Figura 4.18).

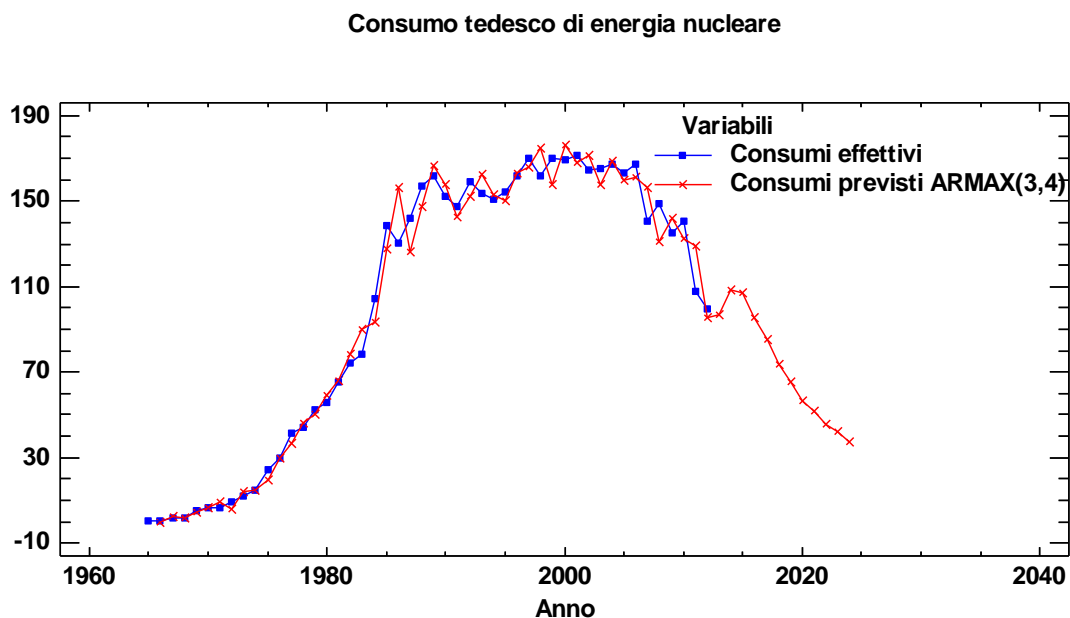


Figura 4.18 - Previsione dei consumi nucleari tedeschi con modello di Guseo-Guidolin + modello ARMAX(3,4) applicato alla parte residuale

La Germania ha risentito molto delle influenze esterne nell'uso dell'energia nucleare. Come negli altri casi, l'evento scatenante che ha portato a puntare fortemente sulla fonte atomica è stata la crisi del 1973.

In questo caso l'incidente di Fukushima ha portato immediatamente ad un cambiamento sostanziale della politica energetica, che sta velocizzando la fase di declino di questa tecnologia: il consumo nucleare avuto nel 2012 non era così basso da quasi trent'anni. Allo stesso tempo, appare piuttosto evidente che la scelta di non investire troppo sull'opzione nucleare in Germania era già stata presa da tempo: gli effetti del disastro di Fukushima non fanno che confermarla.



# Conclusioni

Dopo un'introduzione sulla classe dei modelli di Bass, utili alla previsione dei processi diffusivi di varie tipologie di innovazione, e la definizione dei principali metodi utilizzati per le loro stime, si è passati in questo studio all'applicazione di tali modelli nel contesto dei consumi di energia nucleare in alcuni Paesi. In particolar modo è stato dimostrato come un modello con mercato potenziale variabile si presti molto bene a spiegare l'evoluzione dei consumi nucleari, data l'importanza della comunicazione nel processo diffusivo di tale forma di energia. Le analisi condotte sulle serie storiche dei consumi energetici in questione hanno rivelato come la tecnologia che riguarda la fissione atomica sia attualmente in crisi. Questa situazione solo in parte è dovuta all'evento di Fukushima del 2011, che ha sconvolto il mondo intero e riportato l'attenzione sulla questione della sicurezza delle centrali. È plausibile infatti ritenere che a scatenare questa crisi siano state altre cause, precedenti al disastro giapponese e collegate alla natura intrinseca della tecnologia stessa. Anche se l'energia nucleare ha degli indubbi aspetti positivi, per esempio non produce gas serra e permette di ricavare un enorme quantitativo di energia utilizzando poco combustibile, non si possono tralasciare gli effetti negativi che essa comporta. Oltre alla già citata poca sicurezza del processo di fissione nucleare, dovuta anche a centrali sempre più datate, bisogna infatti considerare gli elevati costi di realizzazione e di smantellamento degli impianti, che non accennano a diminuire e anzi continuano ad aumentare. Questo rende senz'altro l'opzione nucleare economicamente svantaggiosa e porta ad investire sempre meno su questa risorsa. Il problema di avere reattori sempre più obsoleti risiede nell'estensione della loro vita operativa e nella difficoltà che molti Paesi, come Francia e Stati Uniti, hanno incontrato nel costruirne di nuovi, fattori che attualmente rendono il mercato del nucleare poco competitivo e di fatto non ne stimolano la crescita. Tale aspetto è stato ampiamente confermato anche statisticamente nel corso dell'analisi svolta.

Inoltre per interpretare la crisi del nucleare è necessario considerare anche le fonti rinnovabili, che hanno giocato, nell'ultimo decennio in particolare, un ruolo sempre più importante nel contesto energetico mondiale. Ad oggi infatti gli investimenti sulle energie pulite superano di gran lunga quelli sull'energia nucleare, come è visibile in Figura 5.1. Ciò è dovuto a molteplici ragioni, tra cui l'ampio margine di miglioramento per quanto riguarda la capacità delle rinnovabili, che è in costante aumento, a differenza di quella dei reattori che è già sfruttata quasi completamente. Inoltre i costi

delle attrezzature sono, nel caso delle energie pulite, in costante diminuzione, cosa che non si può dire per il nucleare: per questo motivo gli investimenti nel rinnovabile hanno subito un calo nel 2012, che non rappresenta però una diminuzione della capacità installata nello stesso anno.

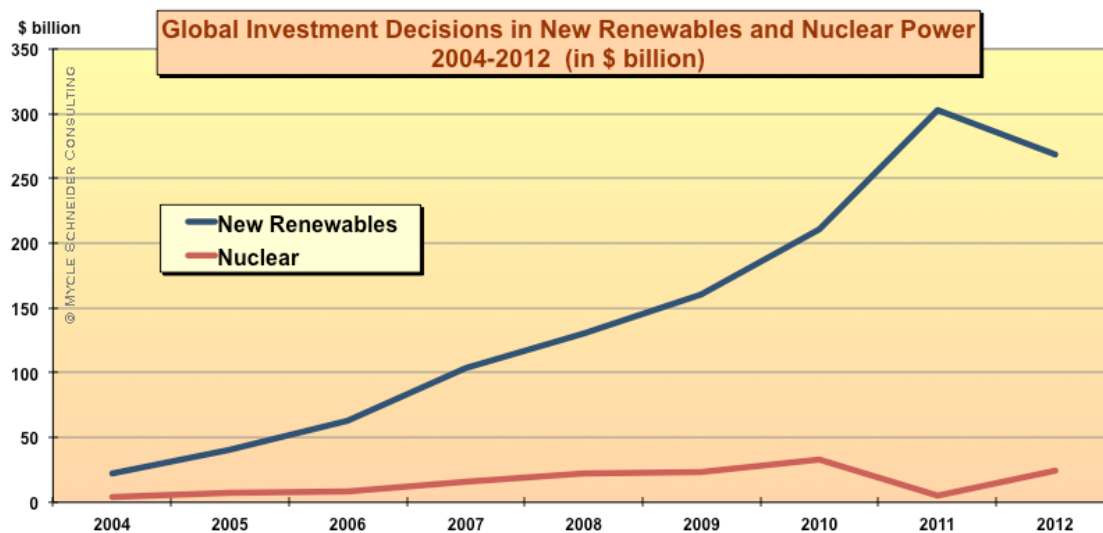


Figura 5.1 - Investimenti mondiali sulle energie pulite e sul nucleare nel periodo 2004-12 (miliardi di dollari)

Tali motivazioni sembrerebbero sfatare il mito di una “rinascita del nucleare”, che secondo alcuni potrebbe avvenire in un prossimo futuro. Il nucleare sembra infatti destinato a porzioni sempre più modeste di un mercato che ormai privilegia altre forme di energia.

# Bibliografia

- Bass, F. M. (1969). A New Product Growth for Model Consumer Durables, *Management Science*, **15**, 215-227.
- Bass, F. M. (2004). Comments on "A New Product Growth for Model Consumer Durables", *Management Science*, **50**, 1833-1840.
- Bass, F. M., Krishnan, T. V., Jain, D. C. (1994). Why the Bass model fits without decision variables, *Marketing Science*, **13**, 203-223.
- Cohen, W. M., Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: A New Perspective on Learning and Innovation, *Administrative Science Quarterly*, **35**, 128-152.
- Di Fonzo, T., Lisi, F. (2005). *Serie Storiche Economiche, Analisi Statistiche e Applicazioni*, Carocci Editore, Roma.
- Guidolin, M., Guseo, R. (2012). A nuclear power renaissance?, *Technological Forecasting & Social Change*, **79**, 1746-1760.
- Guseo, R. (2002). *Organizzazione Statistica dell'Informazione e Scelte di Gestione: seminari ed esercitazioni con floppy disk*, CEDAM, Padova.
- Guseo, R. (2004). Interventi strategici e aspetti competitivi nel ciclo di vita di innovazioni, Working Paper Series N. 11, Department of Statistical Science, University of Padua, Italy.
- Guseo, R., Dalla Valle, A., Furlan, C., Guidolin, M., Mortarino, C. (2013). Emergence of a Pharmaceutical Drug as New Entrant in a Category: Ex Ante Diffusion of Innovation Modeling and Forecasting, Working Paper Series N. 5, Department of Statistical Science, University of Padua, Italy.
- Guseo, R., Guidolin, M. (2009). Market potential dynamics in innovation diffusion: modelling the synergy between two driving forces, Working Paper Series N. 10, Department of Statistical Science, University of Padua, Italy.
- Guseo, R., Guidolin, M. (2009). Modelling a Dynamic Market Potential: A Class of Automata Networks for Diffusion of Innovations, *Technological Forecasting & Social Change*, **76**, 806-820.

Mahajan, V., Muller, E., Bass, F. M. (1990). New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research, *Journal of Marketing*, **54**, 1-26.

Peres, R., Muller, E., Mahajan, V. (2010). Innovation diffusion and new product growth models: A critical review and research directions, *International Journal of Research in Marketing*, **27**, 91-106.

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations*, 5<sup>th</sup> ed., The Free Press, New York.

Seber, G. A. F., Wild, C. J. (1989). *Nonlinear Regression*, Wiley & Sons, New York.

## Sitografia

Carson, C. (2004). La seconda rivoluzione scientifica (1945-1960): Energia nucleare, [http://www.treccani.it/enciclopedia/la-seconda-rivoluzione-scientifica-energia-nucleare\\_\(Storia-della-Scienza\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/la-seconda-rivoluzione-scientifica-energia-nucleare_(Storia-della-Scienza)/).

Enel, [http://www.enel.com/it-IT/group/production/nuclear\\_power/operation/](http://www.enel.com/it-IT/group/production/nuclear_power/operation/).  
[http://www.enel.com/it-IT/group/production/nuclear\\_power/operation/parts.aspx](http://www.enel.com/it-IT/group/production/nuclear_power/operation/parts.aspx).

Schneider, M., Froggatt, A. (2013). World Nuclear Industry Status Report 2013, <http://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20130716msc-worldnuclearreport2013-hr-v4.pdf>.

The Chernobyl accident: UNSCEAR's assessments of the radiation effects, <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>.

World Nuclear Association, [http://world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Three-Mile-Island-accident/#.UmMDm\\_nJTnp](http://world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Three-Mile-Island-accident/#.UmMDm_nJTnp).  
<http://world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Fukushima-Accident/#.UmMEdPnJTno>.

Software utilizzato: Statgraphics Centurion XVI,  
<http://www.statgraphics.com/downloads.htm>