# Omaggio a Galileo

Pietro Cerreta - Associazione ScienzaViva, Centro della Scienza, Calitri (Av)
pietro.cerreta@tin.it

*Abstract:* In omaggio alla figura di Galileo, dalla cui nascita sono trascorsi quattrocentocinquanta anni, l'Associazione ScienzaViva ha voluto attualizzare alcune apparecchiature del grande scienziato per proporle agli alunni delle Scuole e al pubblico comune. Con tecniche artigiane sono stati costruiti pendoli di lunghezze diverse per mostrare in varie situazioni i famosi fenomeni del pendolo. Ulteriori manufatti sono stati realizzati per provare empiricamente la validità del 'teorema delle corde' e per ripetere l'esperimento della 'tettoia', col quale si mostra che una pallina lanciata su un piano inclinato descrive una traiettoria parabolica. A questi oggetti sono state aggiunte due apparecchiature prodotte in precedenza: il 'Calcolatore Gravitazionale', che si basa sul salto di palline d'acciaio da un trampolino, e il 'Cannocchiale', realizzato con comuni lenti oftalmiche.
Si è ricorsi all'ormai diffuso *smartphone* per cronometrare gli intervalli di tempo e, per determinare le velocità delle palline, ai fotogrammi tratti dai video ottenuti con la stessa tecnologia. Particolare attenzione è stata dedicata ai fenomeni fisici del rotolamento delle palline e della risonanza tra pendoli attaccati alla stessa traversa.
Il lavoro compiuto viene descritto in sintesi, rinviando all'evidenza offerta dai filmati del sito <www.scienzaviva.it> a cui si fa puntuale riferimento nel testo.

*Keywords:* Galileo, pendoli, tettoia, corde, calcolatore, cannocchiale

## 1. L'isocronismo e la legge del periodo del pendolo

Come omaggio a Galileo, nella ricorrenza dei quattrocentocinquanta anni dalla nascita, abbiamo voluto attualizzare alcune sue apparecchiature per proporle a mo' di spettacolo, cioè a fini divulgativi, agli alunni delle Scuole e al pubblico comune. Quasi tutte le fasi costruttive si sono svolte in una bottega artigiana.[1]

Su uno dei bracci di una grande T di legno sono agganciati due fili di nailon. Ognuno di essi ha il compito di reggere due palline, una di legno, l'altra di acciaio, entrambe del diametro di circa 4 cm. Palline di legno simili sono acquistabili online, cosa che abbiamo fatto anche noi, mentre quella di acciaio è stata recuperata nell'officina di un meccanico riparatore di macchine agricole, da un grosso cuscinetto

[1] La bottega è quella del falegname Vito Cerreta di Calitri (Av), il quale ha fornito ben volentieri le sue abilità professionali a me e al collega Canio Lelio Toglia ideatori del progetto.

usurato. I fili di nailon sono entrambi lunghi circa 90 cm. Messe in oscillazione con un unico gesto iniziale, le palline vanno di conserva per qualche secondo. In seguito, la pallina di acciaio mantiene quasi per intero l'ampiezza iniziale poiché l'energia perduta a causa dell'attrito con l'aria è trascurabile mentre la pallina di legno riduce la sua ampiezza notevolmente. Le loro frequenze tuttavia restano le stesse, confermando l'esperimento originario eseguito da Galileo e descritto nei *Discorsi* [Pendoli di sughero e di piombo]. Si prova così che due pendoli della stessa lunghezza sono isocroni, anche se le loro elongazioni massime appaiono differenti. Si prova altresì che la frequenza di un pendolo non dipende dalla massa che gli è stata attaccata, ma solo dalla lunghezza.

Sull'altro braccio della T sono agganciati, invece, due fili di nailon rispettivamente di 25 cm e di 100 cm, reggenti a loro volta due sferette di legno uguali. La scelta di tali misure è dipesa dal fatto che teoricamente il pendolo di 25 cm compie in un secondo un'oscillazione completa. Perciò, adoperando il cronometro di un comune *smartphone*, è facile verificare che dieci oscillazioni avvengono in dieci secondi. Ciò fatto, si esegue una ulteriore prova con il pendolo di 100 cm. Secondo i calcoli, questo oscilla completamente in due secondi e la cosa viene verificata con analogo procedimento [Radice quadrata ed isocronismo].

Per eseguire una terza prova abbiamo realizzato un pendolo lungo 225 cm. Questo numero equivale a 9x25 cm e segue la serie dei precedenti e cioè 4x25 (100 cm) e 1x25 (25 cm), in cui i fattori di 25 sono rispettivamente i quadrati degli interi 3,2,1. Tuttavia, per il pendolo di lunghezza uguale a 225 cm, l'asta della struttura precedente non è risultata abbastanza alta (limitata com'è per motivi di trasporto, poiché queste apparecchiature devono essere portate nei luoghi in cui si svolgono gli spettacoli). Perciò è stata aggiunta ad essa una opportuna estensione, in modo tale che quest'ultimo pendolo potesse oscillare senza che l'estremità inferiore toccasse il pavimento. Si è constatato dunque con essa che il tempo occorrente per dieci oscillazioni è uguale a 30 secondi e quindi il periodo di ognuna delle oscillazioni di quest'ultimo è di 3 secondi, entro gli errori sperimentali, come si prevedeva. Il tutto ci consente di rivivere l'esperienza descritta da Galilei, nella quale i tempi di oscillazione dei pendoli risultarono proporzionali alle radici delle loro lunghezze come da lui viene riferito:

> […] volendo, v. g., che 'l tempo d'una vibrazione d'un pendolo sia doppio del tempo d'una vibrazione d'un altro, bisogna che la lunghezza della corda di quello sia quadrupla della lunghezza della corda di questo; ed allora, nel tempo d'una vibrazione di quello, un altro ne farà tre, quando la corda di quello sarà nove volte più lunga dell'altra: dal che ne séguita che le lunghezze delle corde hanno fra di loro la proporzione che hanno i quadrati de' numeri delle vibrazioni che si fanno nel medesimo tempo. [Legge dei quadrati]

Avendo imparato che i pendoli corti sono più vivaci di quelli lunghi, che sono più lenti, per far percepire visualmente questo dato di fatto si è pensato di realizzare il famoso esperimento dell'"onda di pendoli" che si vede spesso anche sul web. Costruito un telaio rettangolare e appoggiatolo su appositi sostegni, abbiamo attaccato alla traversa superiore dieci pendoli bifilari, costituiti sempre da fili di nailon e da palline di legno, di lunghezza progressivamente crescente [Onde di pendoli].

Usando un asse di legno per sollevare le palline tutte insieme, abbiamo messo in moto tutti e dieci i pendoli contemporaneamente. Ne è venuta fuori la cosiddetta 'onda di pendoli', col suo caratteristico modo di presentarsi che dà l'idea di un serpente [Valzer di pendoli]. Benché non propriamente galileiana, ci è sembrato opportuno inserire questa bella esperienza nel contesto dello spettacolo, poiché è strettamente legata alla lunghezza e al periodo dei pendoli di cui Galilei si è per primo occupato.

Altrettanto interessante è apparsa l'opportunità di sfruttare i due pendoli di acciaio e di legno, adoperati in precedenza per l'isocronismo, al fine di mostrare al pubblico il concetto di risonanza. Basta mettere in oscillazione il più pesante, per vedere cominciare a muoversi il più leggero e man mano aumentare la sua ampiezza, a causa dell'eccitazione trasmessa attraverso il sostegno. Identico fatto si verifica, benché più lento e con ampiezze minori, se spinta ad oscillare è la pallina di legno, mentre quella di acciaio è ferma. La stessa lunghezza, che ricordiamo per entrambi è di 90 cm, risulta essere la condizione essenziale. Infatti, mentre si osserva questo fenomeno, si nota pure che il pendolo attaccato alla stessa T, ma avente lunghezza di 100 cm, dondola appena, senza oscillare regolarmente. Va ricordata, infine, la realizzazione di un piccolo, ma efficiente 'Pulsilogium'. [2]

## 2. Il 'teorema delle corde'

Confidando sulle tante dotazioni strumentali del nostro falegname, abbiamo pensato di poterci cimentare nella costruzione di un'altra apparecchiatura per così dire 'galileiana', quella relativa al cosiddetto 'Teorema delle corde'.

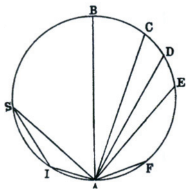


**Fig. 1.** Figura geometrica del Teorema delle corde

Nel 1602 Galileo scrivendo a Guidobaldo dal Monte enunciava così questo teorema:

> Sia del cerchio BDA il diametro BA eretto all'orizzonte, e dal punto A sino alla circonferenza tirate linee *utcumque* AF, AE, AD, AC: dimostro, mobili uguali cadere in tempi uguali e per la perpendicolare BA e per piani inclinati secondo le linee CA, DA, EA, FA; sicché, partendosi nell'istesso momento dalli punti B, C, D, E, F, arriveranno in uno stesso momento al termine A, e sia la linea FA piccola quant'esser si voglia. (Bonera 1995, p. 187)

Si tratta dunque di far vedere che una pallina lasciata cadere in verticale, cioè lungo un diametro, impiega lo stesso tempo di quella che cadrebbe lungo una corda qualsiasi

[2] Un pendolo speciale usato da Galileo per misurare il battito cardiaco dei pazienti.

dello stesso cerchio, anche la più piccola. Piuttosto che attualizzare il modello di C.A. Guadagni del 1764 (Vergara Caffarelli 2009, p. 132), che obbligava le palline a scendere verso il basso lungo fili, ci siamo rifatti ad un *exhibit* del "Deutsches Museum" di Monaco di Baviera, che le faceva correre giù all'interno di tubi trasparenti, verosimilmente di vetro.


**Fig. 2.** Apparecchiatura per l'esperimento sulle corde

Al vetro, noi abbiamo preferito il plexiglas, perché questo è più facile da trattare. Acquistati su internet un paio di tubi di questo materiale del diametro esterno di 2,5 cm, ci siamo poi procurati alcune palline di acciaio con un diametro di 1 cm, smontando un vecchio cuscinetto a sfere.

Con l'aiuto dell'artigiano abbiamo poi realizzato un piano rettangolare di legno sul quale abbiamo disegnato una semicirconferenza. Dai tubi di plexiglas abbiamo ritagliato tre pezzi: due uguali tra di loro e pari al diametro della nostra semicirconferenza, e uno molto più piccolo. I tre tubi sono stati poi fissati sul piano di legno mediante dei supporti metallici, in maniera tale che uno occupasse proprio il diametro della semicirconferenza, l'altro – di identica lunghezza – fosse disposto a fianco in modo da formare un angolo acuto abbastanza ampio con il precedente e il terzo, ancora più in basso, fosse disposto proprio come una corda. Le palline avrebbero dovuto percorrere questi tubi, cadendo dall'alto. Forse qui è utile sottolineare che il secondo tubo non configurava una vera e propria corda ma ne era volutamente più lungo, al fine di poter eseguire su di esso varianti dell'esperimento fondamentale. Pensavamo che la migliore collocazione del dispositivo fosse quella verticale, proprio come enunciava idealmente Galileo, ma abbiamo dovuto ricrederci perché, se in tal guisa, le palline, sottoposte integralmente alla gravità, uscivano dai tubi così rapide da risultare di difficile controllo visuale. Abbiamo quindi deciso di inclinarlo. La componente della gravità nella direzione parallela ad un piano sufficientemente inclinato sarebbe stata molto più piccola e le palline avrebbero attraversato i tubi più lentamente. Proprio perché si trattava di sferette d'acciaio, per vincolarle ai punti scelti come partenze, siamo ricorsi a delle calamite. Le calamite venivano applicate all'esterno dei tubi e poi bastava staccarle per dare il via alle corse delle sferette verso il basso. Nella foto precedente si vede la configurazione finale assunta dalla nostra apparecchiatura. Si nota inoltre che il giovane sperimentatore ha le mani entrambe sollevate. Egli ha appena staccato le due calamite e sta aspettando di constatare se le palline, uscendo dai tubi, si urtano oppure no.

Tuttavia la presenza o l'assenza dell'urto dipende da numerosi e delicati fattori sperimentali di cui è opportuno tener conto. Infatti bisogna pensare che le calamite possono venir staccate non tutt'insieme e che una pallina perciò parta prima dell'altra. Nel tubo, poi, le palline non slittano ma rotolano. (Vergara Caffaelli 2009, pp. 289-290) Cioè, parte dell'energia cinetica, acquistata sotto forma di rotazione, viene giocoforza sottratta a quella di traslazione. Insomma ci sono alcuni piccoli, ineliminabili, ritardi a causa dell'attrito e dell'inerzia rotazionale della pallina. E, infine, non è sempre facile verificare se quel che si osserva all'uscita è un urto o un semplice sfioramento. Per essere certi di quel che è realmente accaduto bisogna riprendere la scena con una videocamera e analizzarla al rallentatore.

É possibile farlo mediante uno *smartphone* (si vedano ad esempio i nostri filmati: [Il teorema delle corde] e [Urti tra palline]). Notevole è l'opportunità di isolare un fotogramma della fase di uscita dai tubi e di paragonare le tracce dei percorsi delle due palline in esso distinguibili. Constatato in tal modo, l'urto risulta notevolmente frequente. Questo dato ci consente di concludere, durante il nostro spettacolo, che Galileo aveva ragione!

## 3. La 'tettoia' di Guidobaldo e Galileo

Nella ricostruzione immaginaria di un dialogo tra Galileo e un suo amico, riportata nel recente libro *Galileo. Scienziato e umanista* (Heilbron 2013, pp.158-159), l'autore fa dire allo scienziato che Guidobaldo dal Monte, suo maestro, ebbe il merito di avviarlo alla comprensione della traiettoria nel moto dei corpi durante una visita a casa sua, durante il primo viaggio da lui compiuto da Pisa a Padova. Essendo entrambi seduti nel giardino di detta casa e precisamente accanto ad una tettoia, a Guidobaldo venne l'idea di provare cosa sarebbe accaduto se avessero fatto rotolare una palla, in salita, lungo la superficie di quel piano inclinato. Insieme, poi, decisero di realizzare quell'esperimento su un piano inclinato più adatto, dopo aver prima tinto d'inchiostro la pallina. Lo eseguirono e constatarono che la traccia lasciata dall'inchiostro era una figura che appariva essere una parabola![3]

[3] In realtà, di che tipo fosse la figura non fu subito chiaro. Si parlò di parabola, ma anche di iperbole e di catenaria. Si veda: [Parabola e catenaria].

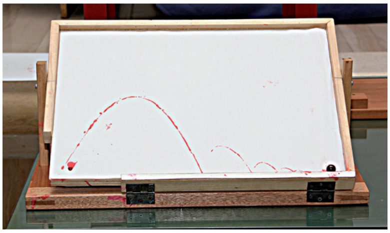

**Fig. 3.** Il nostro modello di ‘tettoia’

Volendo attualizzare questo esperimento non abbiamo fatto altro che progettare una tavoletta inclinabile, sulla quale poter alloggiare un foglio A3. L’abbiamo corredata di una cornice, per inserirvi stabilmente il foglio, e dentro di essa sulla base, a sinistra, abbiamo lasciato aperto un varco, per farvi passare una pallina d’acciaio lanciata con la mano.

La tavoletta trova sostegno su un rettangolo di legno posto in orizzontale, incernierata ad uno dei suoi lati maggiori, ed è retta da due stecche laterali, orientabili sui lati minori. La tavoletta, insomma, ha la possibilità di piegarsi a qualsiasi angolo, ma di stare ben fissa su due posizioni predeterminate.

In un vasetto di alluminio, poi, viene versato il contenuto di una boccetta di inchiostro di china e, in questo, immersa la pallina destinata all’esperimento. Chi opera, indossando un guanto di gomma, non deve fare dunque altro che intingere la pallina nell’inchiostro, estrarla e infine lanciarla delicatamente, verso l’alto, sulla tavoletta già predisposta. Le tante figure che vengono così ottenute, dipendenti ciascuna dall’atto di moto iniziale, risultano essere tutte a forma di parabola. Colpisce il fatto che i rimbalzi successivi lasciavano le tracce di tante, sempre più piccole, che nell’insieme somigliavano all’immagine ottenuta mediante parabole la fotografia stroboscopica del PSSC sulle prime pagine dei tre suoi volumi (vedi la foto precedente). Tuttavia chi volesse vedere l’intero fenomeno può collegarsi a [Parabole con la tettoria]. Contenti di aver ottenuto questi interessanti risultati, abbiamo mandato a Heilbron alcune foto dell’apparecchiatura e dei grafici ottenuti, insieme alle foto delle altre attualizzazioni galileiane da noi costruite. Egli ci ha così risposto:

> Many thanks for the pictures. I’m glad to know that the sloped-roof experiment can be made to work so well. I also liked your demonstration of the theorem that the time of fall along all chords to the bottom of a vertical circle is the same. (Comunicazione privata)

Heilbron dunque si complimenta con noi non solo per l’esperimento della ‘tettoia’, ma anche per il dispositivo creato per il ‘teorema delle corde’.

## 4. Il Calcolatore Gravitazionale

L'"Exploratorium" di San Francisco ha costruito un bellissimo exhibit, il 'Gravity-Powered Calculator', col quale, lasciando cadere una pallina da una certa posizione lungo una pista inclinata, il punto in cui essa atterra corrisponde alla radice quadrata della distanza di partenza. Noi ne abbiamo fatto una versione in miniatura e l'abbiamo chiamata più brevemente Calcolatore Gravitazionale, rispettando in qualche modo il nome originale.

Per accogliere l'atterraggio delle palline provenienti dai vari punti della rampa, abbiamo usato una serie di cinque tazzine di plastica, di quelle che si usano per il caffè, riempite di ovatta per attutire l'urto. L'apparecchiatura è stata concepita in modo tale che se una pallina viene lasciata scendere, ad esempio, dal punto numerato con 16, essa proceda accelerando fino al trampolino e ne esca saltando nella quarta tazzina; se il suo punto di partenza è invece 9, il suo volo finale la condurrà nella terza, ecc.

Chiunque abbia una minima infarinatura di storia della fisica riconoscerebbe l'ascendenza galileiana di questo congegno, basato com'è sulla caduta dei gravi lungo un piano inclinato e sul successivo moto parabolico. Tuttavia questi soli elementi non basterebbero a renderlo un apparecchio galileiano vero e proprio. L'"Exploratorium", da parte sua, non fa alcun cenno a Galilei e lo pubblicizza come aggeggio capace di estrarre la radice quadrata di numeri, usando esclusivamente la forza di gravità. Considerare il congegno solo per quello che fa e non per le sue radici storiche deriva da una certa idea del museo californiano per la quale i visitatori non debbono essere distolti dall'immediata fruizione percettiva delle apparecchiature esposte. Idea che non condividiamo in questo caso.

Al centro del dispositivo in questione, infatti, c'è un breve trampolino orizzontale dal quale saltano le palline dopo aver percorso la rampa inclinata. I balzi da quel trampolino hanno traiettorie paraboliche e si presentano del tutto simili ai disegni riportati da Galileo sul suo *folio 116 v*. Uno studio di S. Drake su tali disegni e sui calcoli eseguiti dallo scienziato pisano accanto ad essi, ha dimostrato che queste traiettorie sono state ottenute da Galilei mediante un "deflettore" tale da produrre gittate direttamente proporzionali alle radici quadrate delle posizioni di partenza.[4] Se Drake ha ragione, possiamo correttamente inferire che i costruttori dell'Exploratorium non hanno fatto altro che applicare, consapevolmente o non, proprio l'espediente adottato da Galileo. L'*exhibit* è, dunque, da intendersi a tutti gli effetti come apparecchiatura galileiana e sarebbe opportuno che i costruttori americani, riconoscendola come tale, tornassero sulla sua denominazione e la cambiassero. Noi suggeriremmo che si chiamasse, ad esempio, 'calcolatore galileiano'.

Quando presentiamo il nostro Calcolatore Gravitazionale non abbiamo sempre la possibilità di discutere della differenza delle due denominazioni precedentemente presentate e ci comportiamo ai fini pratici come se il nostro modello attualizzasse proprio lo schema adoperato di Galileo nel 1608, che è stato oggetto degli studi di Drake a cui abbiamo accennato.

---

[4] Per la completa trattazione di questi argomenti si veda (Cerreta 2014, pp. 27-44) e (Cerreta 2014, pp. 45-60).

Anche in questo caso chi volesse può osservare il funzionamento del nostro dispositivo e come viene accolto dal pubblico collegandosi a: [Il calcolatore gravitazionale].

## 5. Il Cannocchiale

Abbiamo infine costruito un cannocchiale galileiano attingendo alle notizie fornite dal Museo *Galileo* di Firenze. [Costruirsi un cannocchiale galileiano]

Ci siamo procurati le due lenti oftalmiche ivi suggerite e cioè una da -5 diottrie (divergente; focale circa -20 cm) per l'oculare e l'altra da 0,75 diottrie (convergente; focale circa 133 cm) per l'obiettivo. Ma invece di seguire detto progetto passo passo, fissando queste lenti dentro un tubo di cartone, abbiamo realizzato una sorta di strumento alternativo, cioè un banco ottico di legno costituito da una stecca da reggersi sulla mano, su cui scorre un'altra stecca, movibile a piacimento con l'altra mano. All'estremità della stecca inferiore abbiamo fissato un ricettacolo rettangolare di legno per inserirvi la lente oculare, mentre all'estremità opposta, sulla stecca mobile, abbiamo fissato un identico ricettacolo per la lente obiettiva. Mettere e togliere le lenti nei due contenitori costruiti *ad hoc* consente, a chi le usa, la possibilità di confrontarle e di capirne la profonda diversità. Se invece fossero state fissate all'interno del tubo nessuno avrebbe potuto confrontarle con la stessa facilità. Il nostro strumento, benché non sia un vero e proprio cannocchiale, può essere usato benissimo per osservare da vicino i particolari di un oggetto all'esterno dell'aula in cui si svolge la presentazione. Esso viene solitamente messo a disposizione del pubblico per delle prove. É un arnese capace di circa 7 ingrandimenti e la sua è, pertanto, una prestazione paragonabile a quella del prototipo galileiano usato nell'agosto del 1609. In seguito Galileo apportò a questo oggetto dei miglioramenti. Per spiegarli al pubblico ci siamo avvalsi di tre filmati trovati sul sito del predetto Museo Galileo. Per chi volesse poi verificare l'efficacia del nostro apparecchio suggeriamo di collegarsi al sito di [Costruirsi un cannocchiale galileiano].

## Bibliografia

Bonera G. (1995). *Galileo Oggi*. Pavia: Università degli studi di Pavia.

Heilbron J.L. (2013). *Galileo. Scienziato e umanista*. Torino: Einaudi.

Cerreta P. (2014). "Il Gravity-Powered Calculator, un exhibit Galileiano". *Giornale di Fisica*, LV (1), pp. 27-44.

Cerreta P. (2014). "La radice quadrata, un algoritmo nascosto nella gravità". *Giornale di Fisica*, LV (1), pp. 45-60.

Vergara Caffarelli R. (2009). *Galileo Galilei and Motion. A reconstruction of 50 years of experiments and discoveries*. Bologna: Società Italiana di Fisica.

**Sitografia**

[Costruirsi un cannocchiale galileiano]. URL: <http://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/cannocchiale/dswmedia/risorse/costruire_cannocchiale.pdf> [data di accesso: 02/05/2016].

[Il calcolatore gravitazionale]. URL: <http://www.scienzaviva.it/video.php> [data di accesso: 02/05/2016].

[Il teorema delle corde]. URL: <http://www.scienzaviva.it/video_03.php> [data di accesso: 02/05/2016].

[Legge dei quadrati]. URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94907p/f140.item> [data di accesso: 02/05/2016], Giornata Prima, pp. 139-140.

[Onde di pendoli]. URL: <http://www.scienzaviva.it/video_04.php> [data di accesso: 02/05/2016].

[Parabola e catenaria]. URL: <http://crf.uniroma2.it/wpcontent/uploads/2013/02/Lezione4.pdf> [data di accesso: 02/05/2016].

[Parabole con la tettoia]. URL: <http://www.scienzaviva.it/video_07.php> [data di accesso: 02/05/2016].

[Pendoli di sughero e di piombo]. URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94907p/f129.item> [data di accesso: 02/05/2016], Giornata Prima, pp. 128-129.

[Radice quadrata ed isocronismo]. URL: <http://www.scienzaviva.it/video_05.php> [data di accesso: 02/05/2016].

[Urti tra palline]. URL: <http://www.scienzaviva.it/video_017-15.php> [data di accesso: 02/05/2016].

[Valzer di pendoli]. URL: <http://www.scienzaviva.it/video_018-15.php> [data di accesso: 02/05/2016].