

Análise do Desempenho de Modelo Virtual de Religador para Redes de Distribuição de Energia Desenvolvido a partir das Ferramentas da Typhoon HIL

Isabella B. Pereira, Adriano P. De Moraes, Fernando G. K. Guarda, Jhonatan A. Cassol
Centro de Excelencia em Energia e Sistemas de Potência - CEESP
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
isabella.basso@acad.ufsm.br

Abstract—Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise do desempenho do modelo de um religador ao comparar sua atuação completamente ideal com os resultados obtidos através de simulações em tempo real. O modelo foi inserido em um sistema de distribuição onde pode ser sensibilizado a faltas de natureza temporária e permanente. Foi verificado a concordância entre os tempos de atuação, religamento e rearme obtidos em simulação e os resultados ideais, além da correta atuação do modelo proposto.

Index Terms—religadores automáticos, simulação digital em tempo real, modelagem, proteção

I. INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica é o segmento do sistema elétrico de potência responsável por receber a energia dos circuitos de transmissão e entregá-la às unidades consumidoras.

Algumas particularidades do sistema de distribuição, tais como a proximidade aos aglomerados urbanos, presença de alimentadores de grande extensão e de construção aérea, trazem à tona a vulnerabilidade desse sistema em relação a ocorrência de faltas e em consequência a interrupções de energia [2].

Uma falta é uma condição física que impossibilita o correto funcionamento de um determinado dispositivo. As faltas são classificadas de acordo com sua natureza em permanentes e temporárias [3].

As faltas permanentes causam interrupções sustentadas para todos consumidores do trecho em falta, e portanto requerem o deslocamento de uma equipe de manutenção até o local da falta para correção do problema. Já as faltas temporárias podem se extinguir mesmo sem a atuação do sistema de proteção ou são eliminadas pelo simples desligamento momentâneo do sistema, necessário para extinguir o arco elétrico [1].

A referência [1] estima que 75% a 90% das faltas são temporárias. Dessa forma, é preciso que o sistema de proteção

saiba identificar faltas dessa natureza para eliminá-las sem que ocorra uma interrupção de longa duração.

Os dispositivos de proteção contra de sobrecorrente usualmente utilizados em sistemas de distribuição são: chave fusível, seccionizador, conjunto disjuntor/relé e religador [1].

Dentre estes equipamentos, as chaves fusíveis do tipo expulsão são as de uso mais comum, tendo em vista seu baixo custo e simplicidade. A atuação destes dispositivos é dada pela fusão de um elemento fusível (elo), que é aquecido em virtude da passagem de uma sobrecorrente através do mesmo, devido a uma condição de curto-circuito ou sobrecarga [3] [1].

Quando a chave fusível interrompe uma sobrecorrente, seja para remover uma falta na linha ou em um equipamento específico, o elo é destruído. Dessa maneira, para restabelecer o trecho em falta é inevitável o deslocamento de uma equipe de manutenção para reposição do elo fusível. Isto significa que ocorre uma interrupção de longa duração, mesmo se tratando de uma falta temporária.

Dado que a grande maioria das faltas são temporárias, foi desenvolvido um dispositivo de proteção capaz de distinguir faltas temporárias e permanentes. O religador automático atua desconectando e reconectando o circuito quando identifica uma falta. Sendo assim, o religador é capaz de restabelecer o sistema ao eliminar uma falta temporária ou isolar uma falta permanente, garantindo seletividade.

Tendo em vista a importância deste equipamento para a proteção de sistemas de distribuição, foi desenvolvido um modelo virtual de religador automático utilizando as ferramentas de *software* e *hardware* da *Typhoon HIL Inc*, com objetivo de utilizá-lo em estudos de proteção envolvendo simulação digital em tempo real.

Este trabalho apresenta uma análise do desempenho do modelo proposto comparando sua atuação completamente ideal com os resultados obtidos através de simulações em tempo real. Para tanto, o modelo de religador é inserido em um sistema de distribuição.

II. RELIGADORES AUTOMÁTICOS

O religador automático é um dispositivo que tem capacidade de interromper o fluxo de corrente ao detectar uma sobrecorrente e automaticamente religar um circuito de corrente alternada. O dispositivo segue uma sequência pré-determinada de abertura e religamento de seus contatos, sucedida pelo bloqueio (manter os contatos abertos) caso a falta não seja eliminada, caso contrário os contatos são mantidos fechados ou se necessário ocorre o rearme [3].

Um religador possui duas características tempo x corrente de operação, a rápida e a lenta ou temporizada. A diferença entre elas é o tempo necessário para interromper o circuito. Basicamente, a operação rápida garante o restabelecimento automático para faltas temporárias e a operação lenta assegura que o dispositivo mais próximo a falta atue antes que o religador para faltas permanentes, de forma a reduzir o trecho em falta.

Na Fig. 1 é apresentado um exemplo de sequência de operação completa de um religador, constituída por 2 operações rápidas e 2 lentas. Nota-se que a sequência é composta por 4 operações, isto significa que o religador realiza 3 religamentos e 4 disparos, sendo que o último disparo é correspondente ao bloqueio do dispositivo.

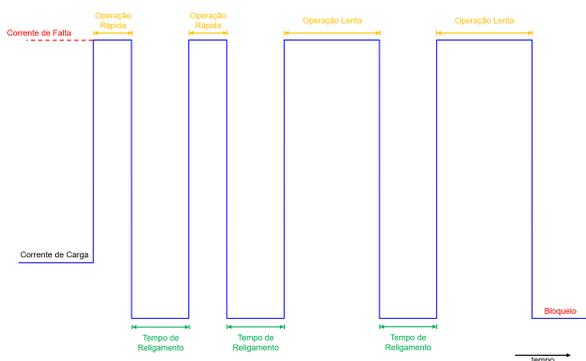


Fig. 1. Exemplo de sequência de operação completa

III. MODELO VIRTUAL DO RELIGADOR

O modelo foi desenvolvido de maneira a reproduzir o comportamento de um religador real. Para tanto, as diversas funcionalidades de um religador foram divididas nos seguintes elementos.

A. Variáveis de Entrada

Para cumprir os critérios do projeto do sistema de proteção é necessário determinar os ajustes do religador. Estes ajustes são tratados como entrada do modelo para que o usuário possa os definir de maneira adequada.

B. Medição de Corrente e Cálculo RMS

Como o religador é um dispositivo que atua ao detectar uma sobrecorrente, fica evidente a necessidade da medição de corrente no circuito de potência do equipamento. Também

deve ser realizado o cálculo da corrente de neutro e dos valores RMS (*Root Mean Square*).

Além disso, no circuito de potência são situados os contatos do religador, que operam de acordo com a unidade de controle para implementar a sequência de operações estabelecida.

C. Proteção de Fase e de Neutro

Para verificar a condição de falta, são empregados blocos de proteção de fase e de neutro. Estes blocos tem sua lógica baseada no funcionamento das unidades temporizadas de um relé de sobrecorrente (funções ANSI 51/51N).

Diversos tipos de relés são utilizados em sistemas de distribuição para monitorar fenômenos e assim, controlar os disjuntores associados. O relé de sobrecorrente temporizado analisa a corrente do circuito, se o valor estiver acima do ajuste definido é enviado um sinal para abertura do disjuntor de forma temporizada. Estes relés são denominados relés de tempo inverso, devido a sua característica tempo x corrente, onde o relé irá operar mais rapidamente com o crescimento da corrente [3].

D. Unidade de Controle

O objetivo do bloco de controle do religador é realizar as operações de abertura e fechamento dos contatos, de modo a implementar uma sequência de operações tal qual a apresentada na Fig. 1, respeitando os tempos de atuação, religamento e rearme para os ajustes estabelecidos, além de operar de forma adequada conforme as características da simulação.

Ainda, a unidade de controle é responsável por diferenciar se a atuação é relativa à proteção de fase ou de neutro, para o caso de ambas proteções estarem habilitadas.

IV. TEMPO DE OPERAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

O tempo de operação, dada a magnitude da corrente de falta, é calculado a partir de (1). As variáveis A , B e P são parâmetros da curva tempo x corrente selecionada.

$$t_{op} = TD \cdot \left(B + \frac{A}{M^P - 1} \right), \quad (1)$$

Onde: t_{op} é o tempo de operação em segundos, TD é o *dial* de tempo e M é o múltiplo da corrente de ajuste.

Usualmente são considerados 10 tipos de curvas características tempo x corrente, 5 do padrão dos EUA e outras 5 do padrão IEC, conforme apresentado na Tabela I. Os parâmetros do padrão EUA são estabelecidos na IEEE C37.112-1996, e os das curvas IEC são definidos pela IEC 60255.

TABLE I
TIPOS DE CURVAS.

U.S.	IEC
U1 - Moderatly Inverse	C1 - Standard Inverse
U2 - Inverse	C2 - Very Inverse
U3 - Very Inverse	C3 - Extremely Inverse
U4 - Extremely Inverse	C4 - Long-Time Inverse
U5 - Short-Time Inverse	C5 - Short-Time Inverse

Com intenção de auxiliar o usuário ao definir os ajustes do religador para obter um tempo de atuação adequado a seu projeto de proteção foi criado o bloco “Curves” no *Typhoon HIL Inc* onde é possível visualizar as diferentes curvas para diversos dias de tempo de maneira intuitiva, tal como apresentado na Fig 2.

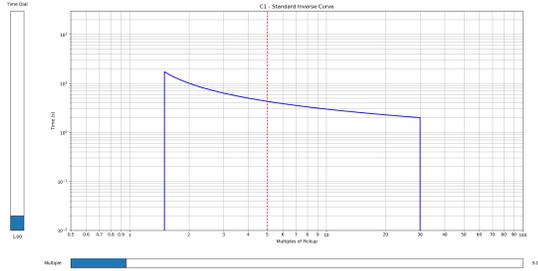


Fig. 2. Exemplo de curva plotada pelo bloco “Curves”

V. SISTEMA-TESTE

Para executar as simulações, o religador deve ser incluído em um sistema de distribuição. Desta maneira, foi desenvolvido um sistema-teste baseado em [6]. O sistema apresentado na Fig. 3 também possui um bloco que emula faltas, para que a proteção seja sensibilizada com correntes de falta e atue corretamente.

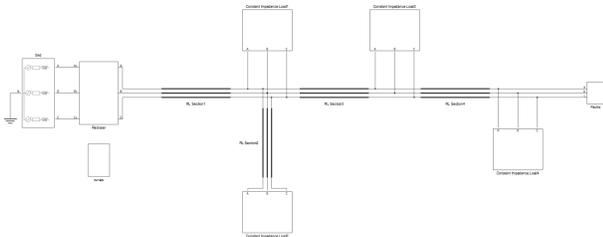


Fig. 3. Sistema-teste

Destaca-se que nas simulações realizadas neste trabalho todo sistema-teste está rodando no HIL402. Caso o usuário não tenha a disponibilidade de um *hardware* para simulação em tempo real, a *Typhoon HIL Inc* oferece a simulação a partir do *Virtual HIL (VHIL)*.

O VHIL é um componente do *software* que emula o *hardware* da *Typhoon HIL Inc*. Em vista disso, a simulação não ocorrerá em tempo real, visto que o passo de simulação irá depender da capacidade de processamento do computador utilizado.

VI. MÉTODO PARA ANÁLISE DE RESULTADOS

Para executar uma simulação em tempo real é necessário que o simulador digital empregado tenha capacidade de resolver as equações do modelo para um passo de tempo de simulação dentro do próprio tempo descrito em um relógio no mundo real [4].

Na prática, se define um passo de tempo adequado para simulação. Se o tempo de execução for menor ou igual a este passo de tempo, se trata de uma simulação em tempo real, caso contrário a simulação é classificada como *offline*. Nesta situação deve-se verificar a possibilidade de aumentar o passo de tempo ou simplificar o modelo desenvolvido, a fim de executar a simulação em tempo real [4].

Para analisar o desempenho do modelo do religador serão monitorados os tempos de atuação, religamento e rearme durante a simulação. Os tempos de atuação obtidos serão comparados com os valores ideais calculados a partir de (1), já os tempos de religamento e rearme serão comparados com os valores determinados pelo usuário. Neste contexto, é importante que a simulação seja executada em tempo real, uma vez que serão verificadas continuamente variáveis de tempo.

Neste trabalho, é utilizado o *hardware* HIL402 [5] para efetuar a simulação. Além disso, foi definido um passo de tempo de simulação de $100\mu s$ para o qual o simulador foi capaz de garantir o determinismo temporal, ou seja, as simulações realizadas são realmente executadas em tempo real.

VII. RESULTADOS

Com o intuito de analisar o desempenho do modelo desenvolvido são averiguadas diversas situações. Para verificar os tempos de atuação do dispositivo de proteção serão realizadas faltas trifásicas e monofásicas, uma vez que é necessário validar o funcionamento do modelo para proteção de fase e de neutro. Também serão realizados testes para confirmar os tempos de religamento e rearme.

Para promover uma simulação satisfatória, os ajustes do religador exibidos na Tabela II foram considerados. Estes parâmetros foram definidos a partir da análise das características do sistema-teste.

TABLE II
PARÂMETROS DO RELIGADOR.

Corrente nominal	40A	
Tempo de religamento	2s	
Tempo de rearme	5s	
Ajuste de fase	Rápida 15	Lenta 18
Curva - fase	IEC - C1	IEC - C2
Dial - fase	0,05	0,1
Ajuste de neutro	8	10
Curva - neutro	IEC - C1	IEC - C2
Dial - neutro	0,02	0,08

A. Proteção de Fase

Ao efetuar uma falta trifásica com impedância de defeito de 3Ω verificou-se uma corrente de falta de $1015,53A$. Com as propriedades do religador definidas pela Tabela II calcula-se os tempos de operação por (1), tem-se o tempo de atuação para operação rápida de $0,6616s$ e para operação lenta de $3,2890s$.

Sabendo os valores ideais para os tempos de atuação é possível seguir para a realização da simulação em tempo real. Nesta análise são realizadas duas simulações para averiguar com precisão os tempos de atuação para cada tipo de operação.

Para isso é efetuada uma simulação com uma sequência de operações de 4 rápidas e outra de 4 lentas.

Na Fig. 4 são apresentados os tempos de atuação do religador para uma falta trifásica realizada aos 14, 2210s.

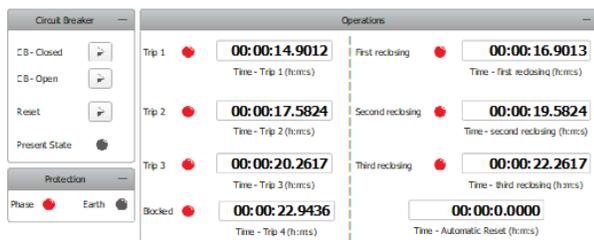


Fig. 4. Tempos de atuação da proteção rápida de fase

Além disso, é interessante notar outros detalhes da Fig. 4. Primeiramente, a atuação foi dada pela proteção de fase, como esperado, já que a corrente de falta não flui pelo neutro do sistema. Ainda, se trata de uma falta permanente, uma vez que ocorreu o bloqueio do dispositivo, e no momento atual o religador encontra-se com os contatos abertos. Para sair da situação de bloqueio, é necessário remover a falta, realizar o *reset* manual e então fechar os contatos do religador novamente.

Na Tabela III são calculados os tempos de cada operação completa bem como o erro percentual ao compará-las com o valor ideal de 0,6616s.

TABLE III
ERRO ASSOCIADO A PROTEÇÃO RÁPIDA DE FASE

Operação	Tempo	Erro %
1	0,6802	1,86
2	0,6811	1,95
3	0,6793	1,77
4	0,6819	2,03

De forma análoga, ao executar a simulação para uma sequência de operações de 4 lentas são obtidos os resultados apresentados na tabela Tabela IV.

TABLE IV
ERRO ASSOCIADO A PROTEÇÃO LENTA DE FASE

Operação	Tempo	Erro %
1	3,2967	0,77
2	3,2915	0,25
3	3,2971	0,81
4	3,2960	0,70

B. Proteção de Neutro

Ao efetuar uma falta monofásica envolvendo a fase A e a terra com impedância de defeito de 3Ω verificou-se uma corrente de falta de 996,41A fluindo no neutro do sistema. Com as propriedades do religador definidas pela Tabela II calcula-se os tempos de operação por (1), tem-se o tempo de atuação para operação rápida de 0,1218s e para operação lenta de 0,7243s.

Realizando a simulação para uma sequência de operações de 4 rápidas são obtidos os resultados apresentados na tabela Tabela V.

TABLE V
ERRO ASSOCIADO A PROTEÇÃO RÁPIDA DE NEUTRO

Operação	Tempo	Erro %
1	0,1381	1,63
2	0,1368	1,50
3	0,1461	2,43
4	0,1371	1,53

Ao executar a simulação para uma sequência de operações de 4 lentas são obtidos os resultados apresentados na tabela Tabela VI.

TABLE VI
ERRO ASSOCIADO A PROTEÇÃO LENTA DE NEUTRO

Operação	Tempo	Erro %
1	0,7392	1,49
2	0,7397	1,54
3	0,7427	1,84
4	0,7399	1,56

C. Análise dos resultados de tempos de atuação

Nas simulações em tempo real realizadas não foi verificado um erro maior que 2,5%, o que confirma um correto funcionamento do modelo de religador proposto.

Também é interessante ressaltar que os valores obtidos em simulação são sempre maiores que o resultado ideal. Isso ocorre pois o sinal de *feedback* das chaves que emulam os contatos do dispositivo tem um atraso em relação ao exato momento em que ocorre a abertura ou fechamento das mesmas, esse atraso ocorre em decorrência do passo de tempo da simulação. Os religadores reais também têm um atraso associado à abertura e fechamento dos contatos, de um tempo equivalente às operações de um disjuntor.

D. Tempos de rearme e religamento

Nas análises anteriores foram realizadas faltas permanentes, para testar o rearme automático do dispositivo é preciso efetuar faltas temporárias. Uma vez que dada a eliminação da falta temporária, é aguardado o tempo de rearme e então as operações são zeradas, de forma que o religador fica pronto para atuar novamente.

No caso de ocorrência de faltas temporárias, a falta pode ser eliminada durante o tempo de religamento, enquanto os contatos estão abertos, ou durante o *trip*, enquanto os contatos estão fechados.

Se os contatos estiverem fechados, o sistema volta a operar com corrente nominal imediatamente após a falha ser eliminada, tal como apresentado na Fig. 5. E o tempo de rearme começará a contar a partir do último religamento que ocorreu, neste caso $r2$.

Em simulação, foi definida uma sequência de operações de 2 rápidas seguidas por 2 lentas e foi efetuada uma falta

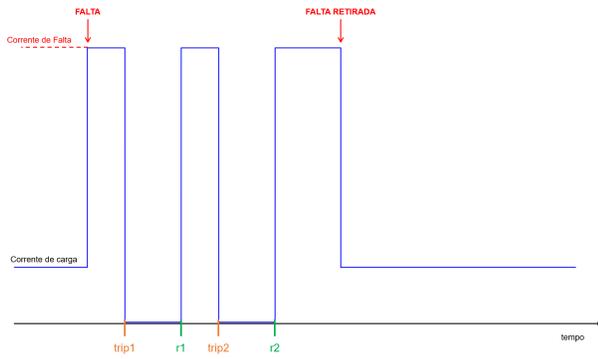


Fig. 5. Falta retirada durante o *trip*

trifásica e a mesma foi retirada seguindo a lógica da Fig. 5. Os resultados obtidos são apresentados no painel da Fig. 6, onde é verificado que o rearme realmente ocorreu visto que no presente momento os contratos estão fechados.

A diferença de tempo entre o segundo religamento $r2$ e o momento em que ocorreu o rearme é de $5,0001s$, lembrando que o valor ideal é de $5s$. Ressalta-se a confirmação do tempo de religamento definido de $2s$.

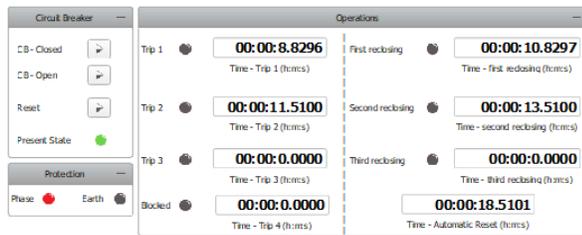


Fig. 6. Tempos de atuação da proteção de fase

Já quando os contatos estão abertos, o sistema passa a operar com corrente nominal após o tempo de religamento ter decorrido. Na Fig. 7 o tempo do rearme automático começará a contar a partir de $r3$.

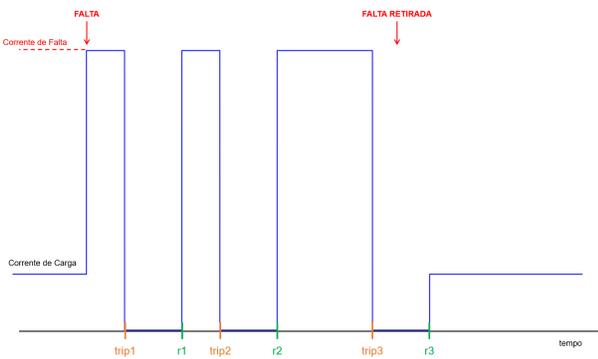


Fig. 7. Falta retirada durante o tempo de religamento

Para simulação, foi definida uma sequência de operações de 2 rápidas seguidas por 2 lentas e foi efetuada uma falta monofásica, a qual foi retirada seguindo a lógica da Fig. 7.

Os resultados obtidos são exibidos no painel da Fig. 8, onde a diferença de tempo entre o terceiro religamento $r3$ e o momento em que ocorreu o rearme é de $5,0001s$. Ressalta-se a confirmação do tempo de religamento definido pelo usuário na Tabela II.

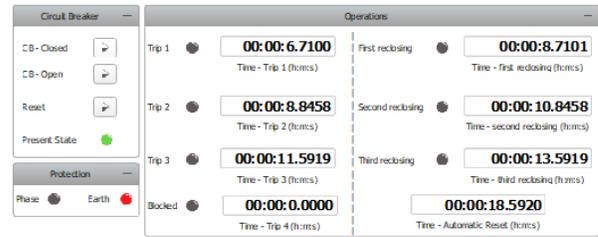


Fig. 8. Tempos de atuação da proteção de neutro

VIII. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o modelo virtual de um religador, detalhando suas especificações. A fim de verificar o desempenho do modelo proposto foram realizadas simulações em tempo real, cujos resultados foram comparados com o comportamento ideal do dispositivo. Para executar estas simulações foi criado um sistema-teste para incluir o religador e efetuar faltas no sistema, também foram definidos os ajustes do dispositivo de proteção de acordo com as características do sistema de distribuição utilizado.

As simulações foram executadas a partir do *hardware* HIL402 e ao analisar os tempos de atuação, religamento e rearme para diversas situações foram obtidos resultados que confirmam a correta modelagem de um religador real.

Portanto será possível incluir o bloco do religador e o bloco *Curves* na biblioteca do *software* da *Typhoon HIL Inc* para uso em qualquer sistema de proteção a ser estipulado pelo usuário.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo aporte financeiro no desenvolvimento desta pesquisa. Os autores também agradecem o apoio técnico da *Typhoon HIL Inc*.

REFERENCES

- [1] Gonen, T. (2014). Electric power distribution engineering. CRC Press, third edition.
- [2] Junior, G.C. and Ferreira, G.D. (2009). Aplicação de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição, 1.14 edition
- [3] Short, T. (2004). Electric power distribution handbook. CRC Press LLC.
- [4] Omar Faruque, M.D., Strasser, T., Lauss, G., Jalili Marandi, V., Forsyth, P., Dufour, C., Dinavahi, V., Monti, A., Kotsampopoulos, P., Martinez, J.A., Strunz, K., Saedifard, M., Wang, X., Shearer, D., and Paolone, M. (2015). Real-time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2(2), 63–73. doi: 10.1109/JPETS.2015.2427370.

- [5] Typhoon HIL (2022). Hardware. URL <https://www.typhoon-hil.com/hil-hardware/>.
- [6] Kindermann, G. (1997). Curto-Circuito. Sagra Luzzatto, second edition.