

Medindo e Melhorando a Capacidade de Chaveamento de Contatos Metálicos

Tony Lee e Edmund O. Schweitzer, III
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
54th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference
Atlanta, Georgia
3–5 de maio de 2000

Apresentado previamente na
53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, abril de 2000

Originalmente apresentado na
26th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 1999

Traduzido para o português em fevereiro de 2017

MEDINDO E MELHORANDO A CAPACIDADE DE CHAVEAMENTO DE CONTATOS METÁLICOS

Tony Lee
Edmund O. Schweitzer III, Ph.D.
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
Pullman, WA USA

INTRODUÇÃO

Os contatos metálicos são praticamente ideais quando eles estão abertos ou fechados. Enquanto está aberto, mesmo um contato muito pequeno pode suportar vários milhares de volts entre seus contatos, sem ser deteriorado. Enquanto está fechado, mesmo um contato muito grande tem menos de miliohms de resistência de contato. Entretanto, quando os contatos metálicos fecham ou interrompem corrente de carga, eles estão muito longe de serem perfeitos. Este *paper* discute o processo de fechamento e interrupção dos contatos metálicos. Vamos nos concentrar nos contatos próprios para serem usados como contatos de saída dos modernos relés de proteção, porém grande parte da discussão pode ser estendida para qualquer contato metálico. Vamos investigar a causa fundamental de falhas relacionadas ao chaveamento e apresentar soluções para alguns problemas comuns porém ainda não completamente entendidos.

CAPACIDADE DE FECHAMENTO DOS CONTATOS

O contato mostrado na Figura 1 é um relé *reed* cuja função é energizar a entrada dos contatos do equipamento de comunicação de alta velocidade. Escolhemos os relés *reed* em função de sua velocidade e dos requisitos de chaveamento aparentemente limitados da aplicação. Entretanto, observamos que muitos desses contatos fundiram-se fechados, embora o circuito de entrada do contato tenha limitado a corrente chaveada em um valor bem abaixo da capacidade nominal do contato. Verificações adicionais mostraram que o circuito de entrada do contato tinha capacitores para supressão de surto conectados em cada lado do circuito para a terra, conforme mostrado na Figura 1.

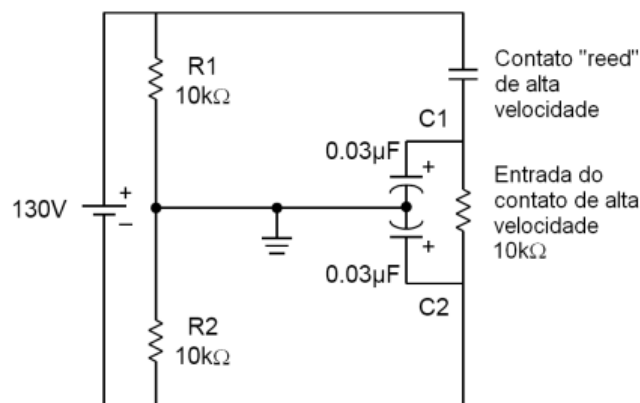


Figura 1: Contato Reed de Alta Velocidade Chaveando a Entrada de um Contato de Alta Velocidade

Quando o contato da Figura 1 está aberto, não há corrente circulando através do circuito de entrada do contato, logo ambos os lados do circuito de entrada do contato estão a -65 volts em relação à terra. Uma vez que ambos os lados da entrada do contato estão no mesmo potencial, ambos os capacitores de supressão de surto, C1 e C2, estão carregados a -65 volts. Após o contato estar fechado por algum tempo, C1 é carregado a +65 volts e C2 permanece carregado a -65 volts.

Quando o contato fecha, uma corrente de pico de surto de chaveamento circula através de C1 e C2, carregando C1 de -65 volts para +65 volts e C2 de -65 para -130 volts. A corrente de chaveamento é limitada em magnitude somente pela conexão, fiação, indutância e resistência da bateria e do contato. Após algum tempo, C2 descarrega através de R2 e retorna para o valor de -65 volts. Nós concluímos, por hipótese, que essa corrente foi responsável pela fusão dos contatos do relé *reed*.

Para testar nossa hipótese, montamos o circuito da Figura 1 e operamos o contato. O contato fundiu-se fechado após quatro operações. Substituímos, então, o contato e instalamos 200 ohms em série com o novo contato. O contato *reed* operou 1000 vezes sem uma falha. Em seguida, aumentamos C1 e C2 de 0,03 microfaraday para 0,3 microfaraday, e finalmente para 3 microfaradays. O contato *reed* operou outras 1000 vezes sem uma falha.

A análise abaixo demonstra, de uma melhor forma, o mecanismo de falha. O circuito mostrado na Figura 2 é equivalente, em relação ao contato, ao circuito da Figura 1. R_C é a resistência associada ao contato e R_E é a resistência equivalente da parte remanescente do circuito, devida às conexões, fiação, etc. R_S é a resistência *shunt* da carga considerada. Como esperamos que R_S seja grande se comparada à $R_C + R_E$, vamos ignorar R_S no resto desta análise.

Os contatos são danificados pela temperatura excessiva. As temperaturas excessivas são geradas quando um contato absorve muita energia. A energia (E) é a integral da potência (P) em relação ao tempo.

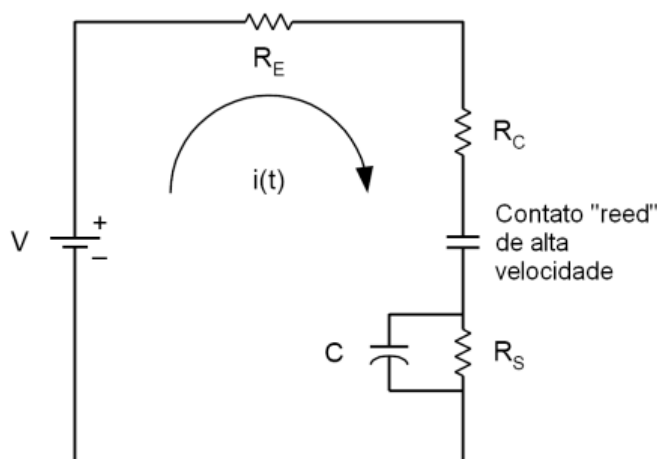


Figura 2: Circuito Equivalente ao da Figura 1.

Queremos calcular o quanto de energia que a resistência de contato R_C absorve. A corrente que circula após o fechamento do contato é dada por:

$$i(t) = \frac{V}{R_L} e^{\frac{-t}{R_L \cdot C}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde $R_L = R_C + R_E$.

A potência instantânea dissipada por R_C é

$$p(t) = i^2(t) \cdot R_C$$

e a energia dissipada por R_C é a integral da potência em relação ao tempo, ou

$$E = \int_0^{\infty} p(t) dt = R_C \int_0^{\infty} i^2(t) dt$$

Substituindo $i(t)$ da Equação 1 acima e integrando, temos

$$E = \frac{R_C}{R_L} \cdot \frac{1}{2} CV^2 = \frac{R_C}{R_C + R_E} \cdot \frac{1}{2} CV^2 \quad \text{Equação 2}$$

A energia $\frac{1}{2}CV^2$ é armazenada no capacitor. Portanto, a Equação 2 nos mostra que a energia dissipada pelo contato é uma fração da energia que é armazenada no capacitor. A fração é a relação da resistência do contato pela resistência total do circuito. Por exemplo, se efetuarmos a resistência total do circuito 100 vezes a resistência do contato, menos de 1 por cento da energia capacitiva é absorvida pelos contatos.

Observe que a análise e o resultado seriam os mesmos se estivéssemos descarregando o capacitor de V para zero volts através do contato, pois a equação da corrente circulante no contato seria a mesma da Equação 1.

Podemos rearranjar a Equação 2 como

$$E = \frac{R_C V}{R_L} \cdot \frac{1}{2} CV = I_{PK} \cdot R_C \cdot \frac{1}{2} CV$$

Onde I_{PK} é o valor de pico de $i(t)$ pela Equação 1.

Isto mostra que o dano ao contato é proporcional à corrente de pico. Logo, se tivermos uma tensão de circuito aberto V , uma capacitância *shunt* da carga C e um contato com resistência R_C , o único recurso que temos para reduzir o dano ao contato é reduzir I_{PK} . A inserção de um resistor de 200 ohms em série com o contato pequeno, próximo a esse contato pequeno, elimina o problema sem efeitos secundários não desejados.

CAPACIDADE DE INTERRUPÇÃO DOS CONTATOS

A partir daqui, neste *paper*, investigaremos a capacidade de interrupção de um contato de saída de um relé de proteção. O contato é especificado pelo fabricante para interromper não mais do que 0,4 ampere indutivo com uma fonte de tensão de 125 volts. No final deste *paper*, mostraremos como o mesmo contato pode interromper acima de 100 amperes de carga indutiva acionada por uma tensão da fonte da ordem de 250 Vdc. As técnicas aplicadas neste *paper* são aplicáveis a qualquer contato metálico usado para chavear cargas *dc*.

Interrupção de Cargas Resistivas

A Figura 3 mostra um circuito de teste que nós usamos para investigar a capacidade de interrupção de nosso contato de saída do relé de proteção, com uma carga puramente resistiva. A Figura 4 mostra a tensão desenvolvida no contato no Canal 1 ($V1$ na Figura 3) e a corrente circulante através do contato no Canal 2 ($V2$ na Figura 3), quando os contatos abrem durante uma interrupção resistiva.

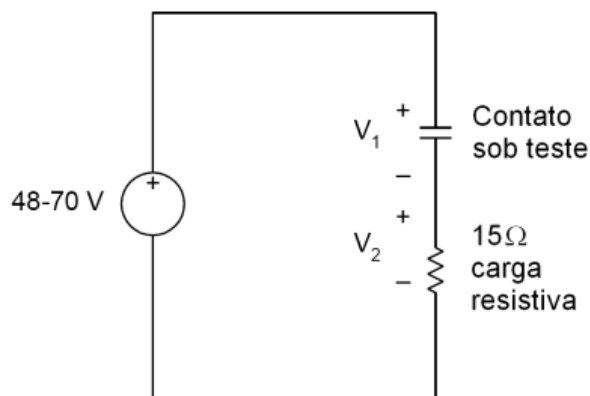


Figura 3: Circuito de Teste com Interrupção de Carga Resistiva

Inicialmente, na Figura 4, o contato está fechado, a tensão no contato está próxima de zero e a corrente no contato é limitada em torno de 3,2 amperes pelo resistor da carga de 15 ohms e fonte de alimentação de 48 volts. No instante em que os contatos começam a se separar, a tensão no contato aumenta para aproximadamente 12 volts e a corrente diminui em 12 volts/15 ohms, ou 0,8 ampere, para 2,4 amperes. Na verdade, na Figura 4, cada aumento da tensão no contato tem uma queda correspondente na corrente do contato, conforme esperado para uma carga puramente resistiva.

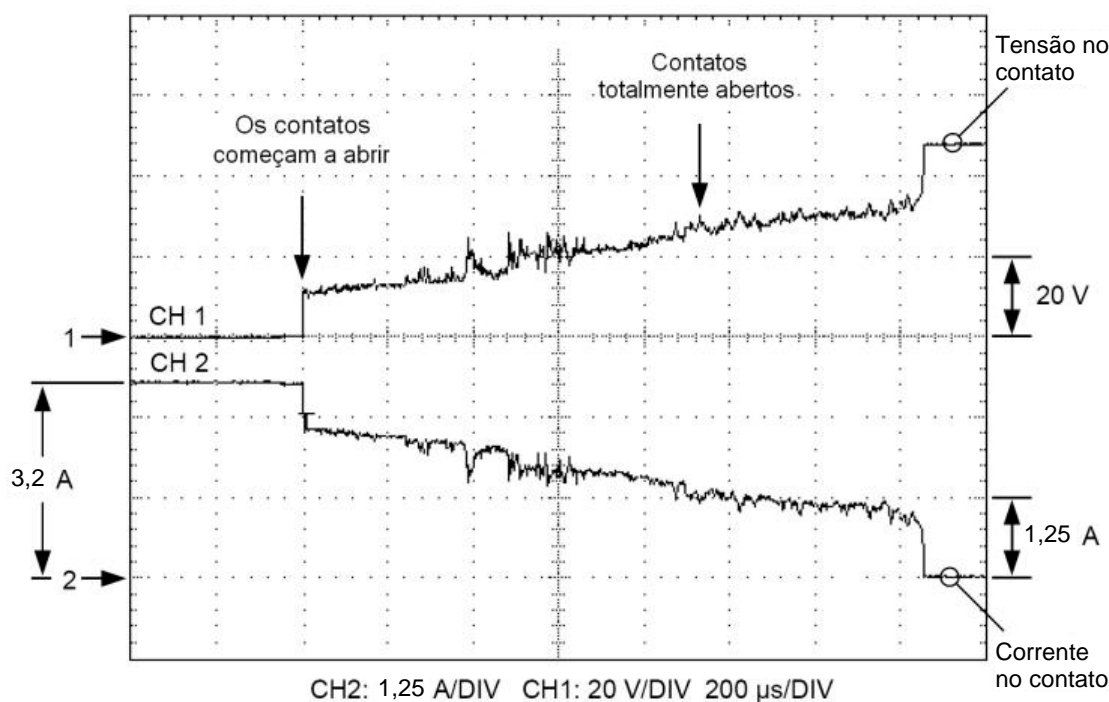


Figura 4: Corrente e Tensão no Contato Durante a Interrupção de uma Carga Resistiva

Na Figura 4, para este arranjo particular do contato, os contatos atingem a separação total em torno de 900 microssegundos, ou aproximadamente 4,5 divisões horizontais após o início da separação dos contatos. O aumento da tensão no contato a partir do início da separação, até a separação total, pode ser atribuído a um aumento do espaçamento dos contatos, uma vez que os contatos se movem, separando-se um do outro. Entretanto, durante os últimos 600 microssegundos após os contatos terem atingido a completa separação, a tensão do contato continua a aumentar enquanto a corrente continua a diminuir. Isto mostra uma importante característica da resistência negativa do arco elétrico [3]. Correntes de arco menores produzem tensões de arco maiores.

A tensão no contato continua a aumentar até que ela passa abruptamente para a tensão de circuito aberto, em torno de 48 volts. Ao mesmo tempo, a corrente diminui abruptamente para zero. Aparentemente, para uma corrente em torno de 1 ampere, a característica de condução do arco muda de uma tensão relativamente baixa para uma tensão maior. Isto leva a corrente para zero, e acaba com o arco elétrico. Posteriormente, quando estivermos abordando a interrupção de cargas indutivas, discutiremos novamente esta alteração da característica de condução.

Mesmo se o arco for eventualmente interrompido, o processo do arco pode degradar substancialmente as faces do contato. Os contatos são danificados pelas altas temperaturas que ocorrem quando eles absorvem energia em excesso. A energia é o produto da potência pelo tempo; a potência é o produto da corrente pela tensão. Podemos facilmente calcular a energia gerada pelo arco elétrico da Figura 4. A média da corrente é de aproximadamente 1,7 ampere e a média da tensão está em torno de 22 volts, cada uma por aproximadamente 1,44 milissegundo.

$$1,7 \text{ A} \cdot 22 \text{ V} \cdot 1,44 \text{ ms} = 0,05 \text{ J}$$

Esperamos que o dano provocado aos contatos seja proporcional a esta energia. Posteriormente, usaremos este valor como uma referência comparativa.

Para entender o porquê da formação inicial do arco elétrico, vamos nos concentrar no instante em que os contatos iniciaram a separação. A Figura 5 detalha o aumento abrupto da tensão do contato no instante inicial da separação dos contatos. Essa figura mostra novamente a tensão desenvolvida no contato no Canal 1 e a corrente circulante através do contato no Canal 2. Observe a mudança na escala de tempo e o ganho do Canal 1 em relação à figura anterior. A tensão no contato é mostrada agora considerando $\frac{1}{2}$ volt por divisão, e a taxa de varredura foi aumentada de 200 microssegundos para 20 microssegundos por divisão.

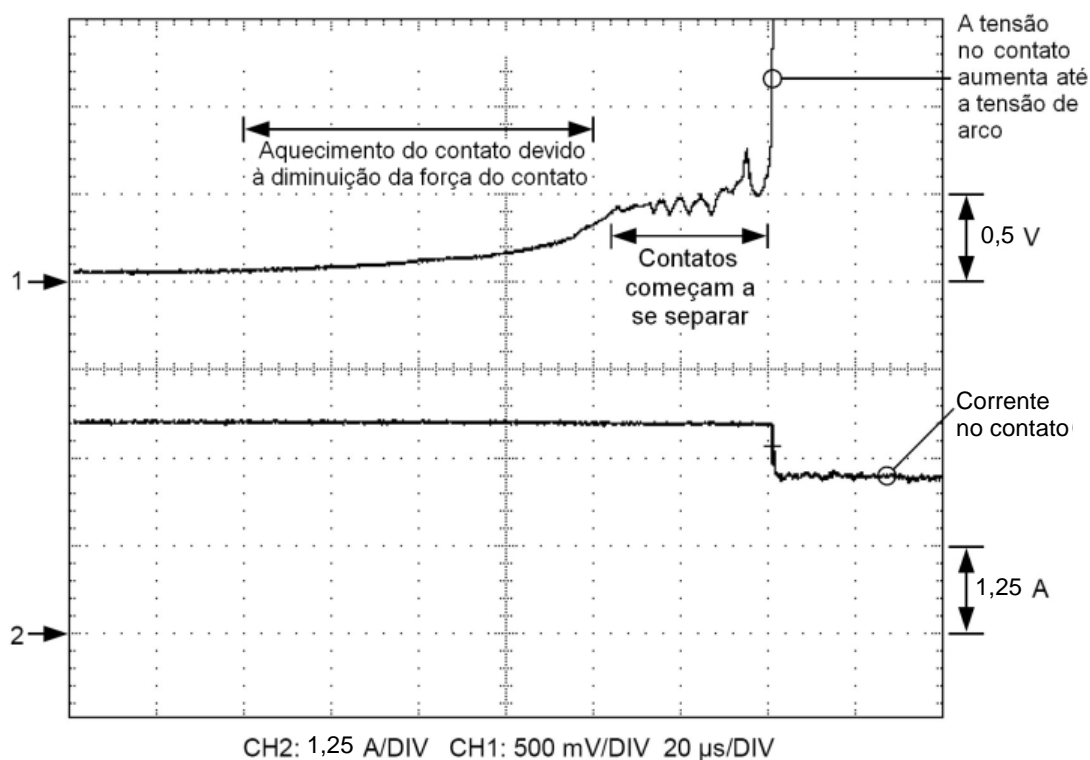


Figura 5: Corrente e Tensão no Contato à Medida que os Contatos se Separam Durante a Interrupção de uma Carga Resistiva

Imediatamente antes da separação dos contatos, ocorrem diversos problemas. Primeiro, a força do contato diminui, o que provoca o aumento da resistência de contato. A corrente de carga circulante através dessa resistência aumentada do contato aquece os contatos. Esse aumento na resistência de contato cria uma tensão aumentada no contato, a qual podemos ver na Figura 5, a partir de aproximadamente 40 até 120 microssegundos. Observe que durante esse tempo, a corrente do contato permanece constante, de forma que o aumento na tensão do contato somente pode ser causado por um aumento na resistência do contato.

Em seguida, algumas partes das faces dos contatos se separam, enquanto outras partes permanecem em contato. Isto força a corrente de carga para as poucas porções das faces remanescentes onde os contatos ainda se tocam e, novamente, provoca o aumento da temperatura naqueles pontos. O efeito disso está mostrado na Figura 5, a partir de aproximadamente 120 até 160 microssegundos. Imediatamente antes de os contatos finalmente se separarem, o último ponto de contato das faces dos contatos frequentemente derrete, e pode até vaporizar, devido à corrente de carga estar confinada numa pequena área da face do contato. À medida que os contatos continuam a se separar, eles podem deixar metal derretido e vaporizado no percurso, contaminando o espaço entre contatos.

Quando os contatos finalmente se separam, o espaçamento do contato é pequeno, está contaminado por metal derretido e vaporizado, e as suas faces estão quentes. Estas são as perfeitas condições para um arco elétrico.

Se houver a ignição de um arco elétrico, ele pode não ser extinto por dezenas de milissegundos, ou até segundos, se nunca for extinto. Se o arco elétrico não é extinto, então os contatos são destruídos e a carga não é desenergizada, podendo também ser destruída. No mínimo, algum dispositivo de proteção, tal como um fusível no painel, é forçado a operar. Tal caso está mostrado na Figura 6. Observe que a taxa de varredura diminuiu para 10 milissegundos por divisão.

Na Figura 6, a tensão da fonte é 56 volts, o que aumenta a corrente de carga para 3,7 amperes. O contato falhou na interrupção da carga, e os contatos foram eventualmente destruídos. Compare a Figura 6 com a interrupção com sucesso mostrada na Figura 4.

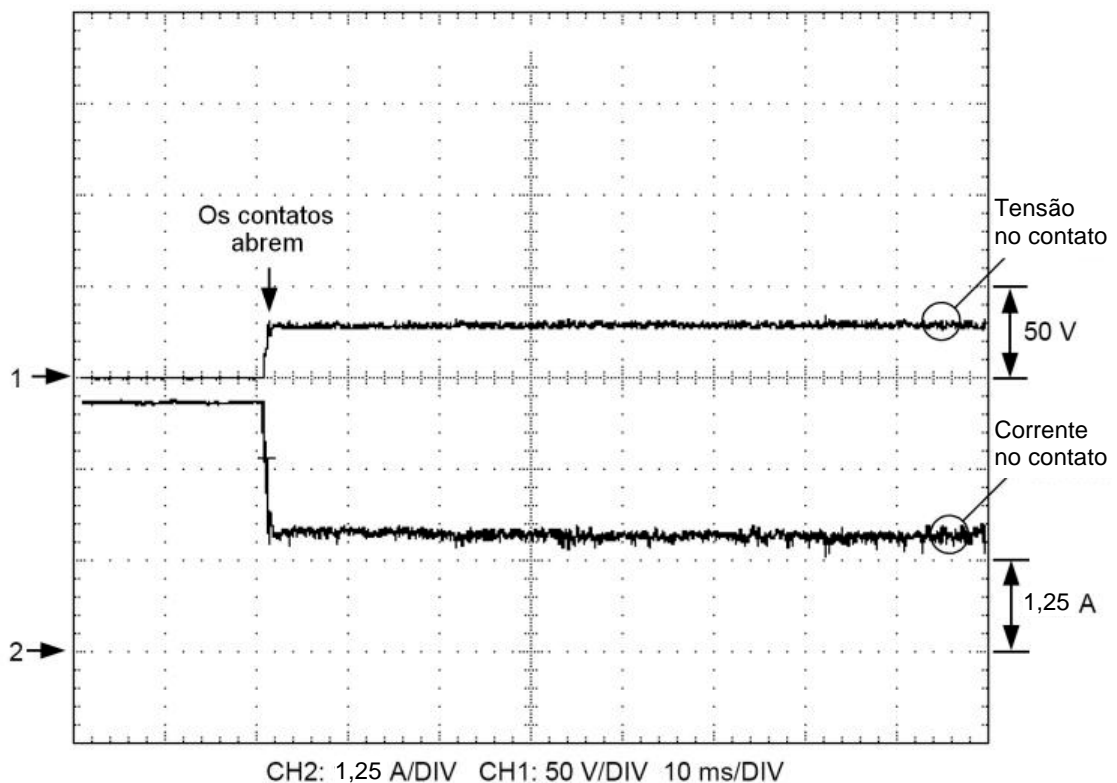


Figura 6: Falha na Interrupção de uma Carga Resistiva

Na Figura 4, após a corrente ter diminuído para aproximadamente 1 ampere, a característica de condução do arco mudou e a corrente caiu abruptamente para zero. Na Figura 6, a corrente se estabiliza em aproximadamente 1,7 ampere, e a característica de condução não muda. Aparentemente, essa mudança na característica de condução é necessária para interromper a corrente de carga deste circuito. Sem isso, a corrente de carga não é interrompida. Posteriormente, neste *paper*, discutiremos com mais detalhes a mudança na característica de condução do arco.

Interrupção de Cargas Indutivas

Contatos não Revestidos (*Bare Contacts*)

A seguir, mudamos a carga de puramente resistiva para uma combinação de resistência e indutância. A Figura 7 mostra as conexões do circuito.

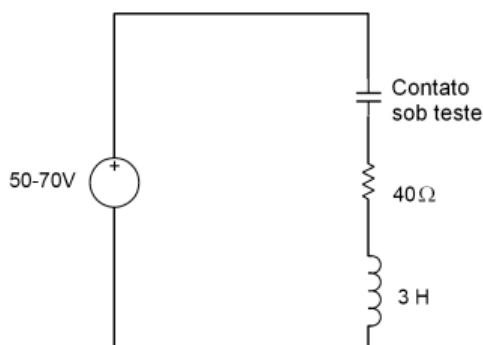


Figura 7: Circuito de Teste para Interrupção de uma Carga Indutiva

A corrente e a tensão do contato estão mostradas na Figura 8. Observe as mudanças na escala da Figura 8. A taxa de varredura é agora 10 milissegundos por divisão e a tensão do contato no Canal 1 considera 100 volts por divisão. A corrente de pico é limitada em aproximadamente 1,4 ampere pela resistência do circuito de 40 ohms e pela tensão da fonte de 57 volts. Quando os contatos se separam, a tensão no contato se altera, indo de quase zero para aproximadamente 30 volts.

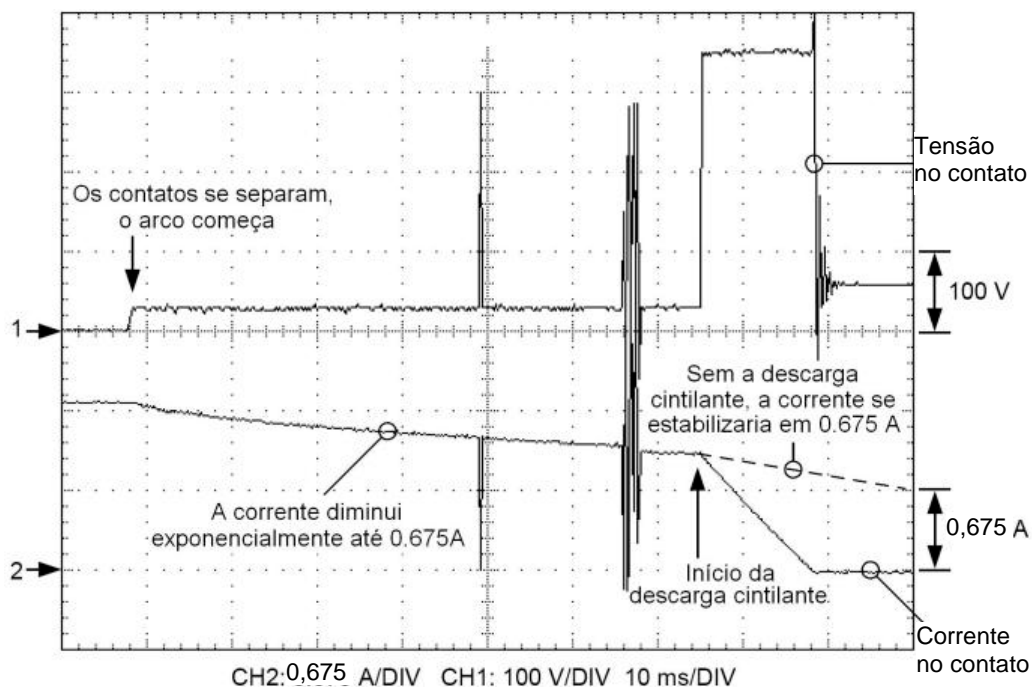


Figura 8: Tensão e Corrente no Contato Durante uma Interrupção Indutiva de 1,4 Ampere

Mesmo se a tensão no contato aumentar 30 volts, a corrente no contato não diminui imediatamente como no caso da resistiva. Ao invés disso, a corrente diminui gradualmente de 1,4 ampere para um novo valor do estado em regime de:

$$\frac{(57 \text{ V} - 30 \text{ V})}{40 \Omega} = 0,675 \text{ A}$$

A taxa com que a corrente diminui é determinada pela constante de tempo do circuito, a qual, para este caso, é:

$$\frac{3 \text{ H}}{40 \Omega} = 75 \text{ ms}$$

Esta análise geralmente está de acordo com as formas de onda mostradas na Figura 8 para os primeiros 65 milissegundos da interrupção. Entretanto, à medida que a corrente diminui para aproximadamente 1 ampere, a tensão no contato aumenta de aproximadamente 30 volts para 350 volts devido a algum fenômeno de condução de alta tensão. Uma vez que o contato então suporta 350 volts e, a resistência do circuito suporta aproximadamente $1 \text{ A} \cdot 40 \Omega$ ou 40 volts no instante em que a característica de condução muda, o indutor suporta aproximadamente:

$$57 \text{ V} - 40 \text{ V} - 350 \text{ V} = -333 \text{ V}.$$

A elevada tensão negativa no indutor deve resultar numa queda quase linear da corrente, a uma taxa de aproximadamente:

$$\frac{333 \text{ V}}{3 \text{ H}} = 111 \text{ A/s}$$

ou, na escala de tempo do gráfico, aproximadamente 1,1 ampere por 10 milissegundos, o que realmente ocorre no gráfico da Figura 8.

Conforme abordado na Referência [1], sugerimos que o fenômeno da condução de alta tensão é uma descarga cintilante, conforme descrito na Referência [2]. Se a descarga cintilante não ocorresse, a corrente teria aparentemente se estabilizado em torno de 0,675 ampere, e não teria sido interrompida.

Podemos testar esta teoria aumentando a tensão da fonte até que a corrente de arco em regime seja aproximadamente 1 ampere, o que deve evitar que ocorra a descarga cintilante. Com uma tensão do arco de 30 volts, a corrente vai se estabilizar em 1 ampere se a tensão da fonte for aumentada para 70 volts.

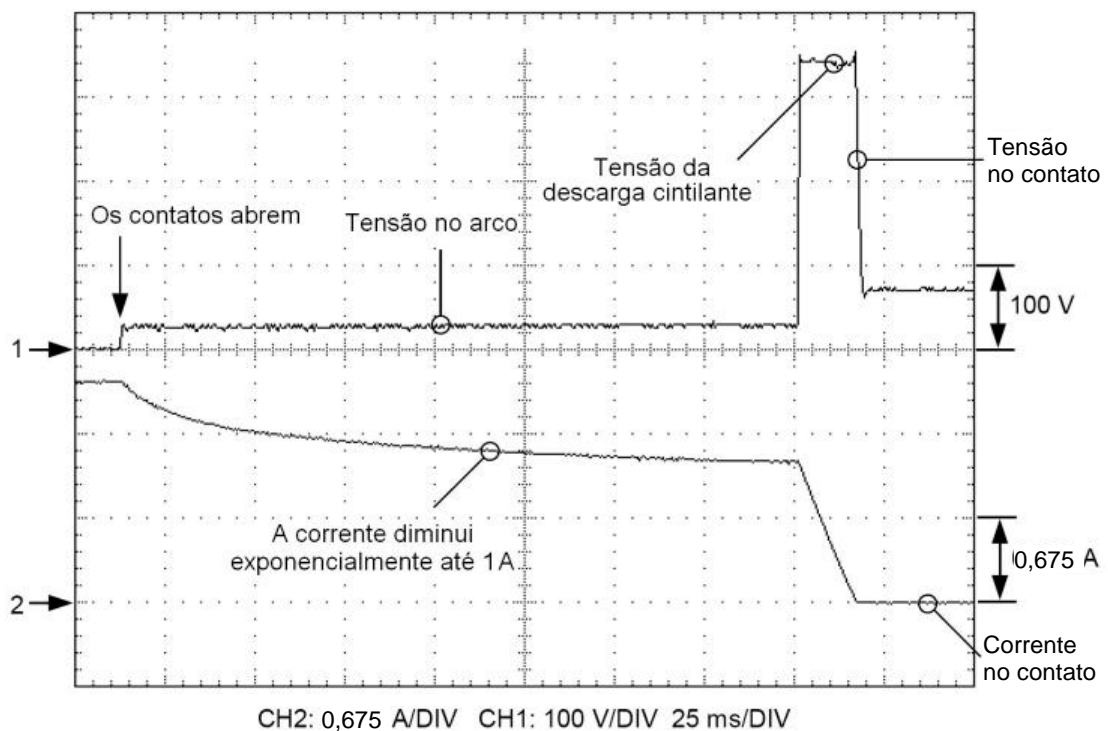


Figura 9: Tensão e Corrente no Contato Durante uma Interrupção Indutiva de 1,7 Ampere

A Figura 9 mostra o caso em que a tensão da fonte é aumentada para 70 volts. A corrente de arco se aproxima assintoticamente do valor de 1 ampere e a descarga cintilante somente começa após quase 190 milissegundos. O que parece é que, sem a descarga cintilante, a corrente teria se estabilizado em algum valor diferente de zero, e os contatos teriam sido destruídos.

A Figura 10 mostra o caso em que a tensão da fonte é aumentada para 72 volts. A corrente se estabiliza logo acima de 1 ampere, e a descarga cintilante não ocorre mesmo após 750 milissegundos. Na verdade, a corrente não foi interrompida e os contatos foram destruídos neste caso.

Voltando à Figura 9, onde a corrente foi interrompida com sucesso, podemos estimar a energia dissipada através dos contatos. A porção de arco média é de aproximadamente 30 volts nos contatos e de 1,3 ampere por aproximadamente 190 milissegundos, para um total de 7,4 joules. A descarga cintilante forneceu 350 volts para os contatos e uma média de aproximadamente 0,53 ampere por 17,5 milissegundos ou aproximadamente 3,2 joules. Portanto, a energia total do arco e da descarga cintilante, para este caso, foi de 10,6 joules. Mesmo com o valor da corrente em torno da metade da do caso resistivo considerado anteriormente, a carga indutiva gerou mais de 200 vezes a energia do arco.

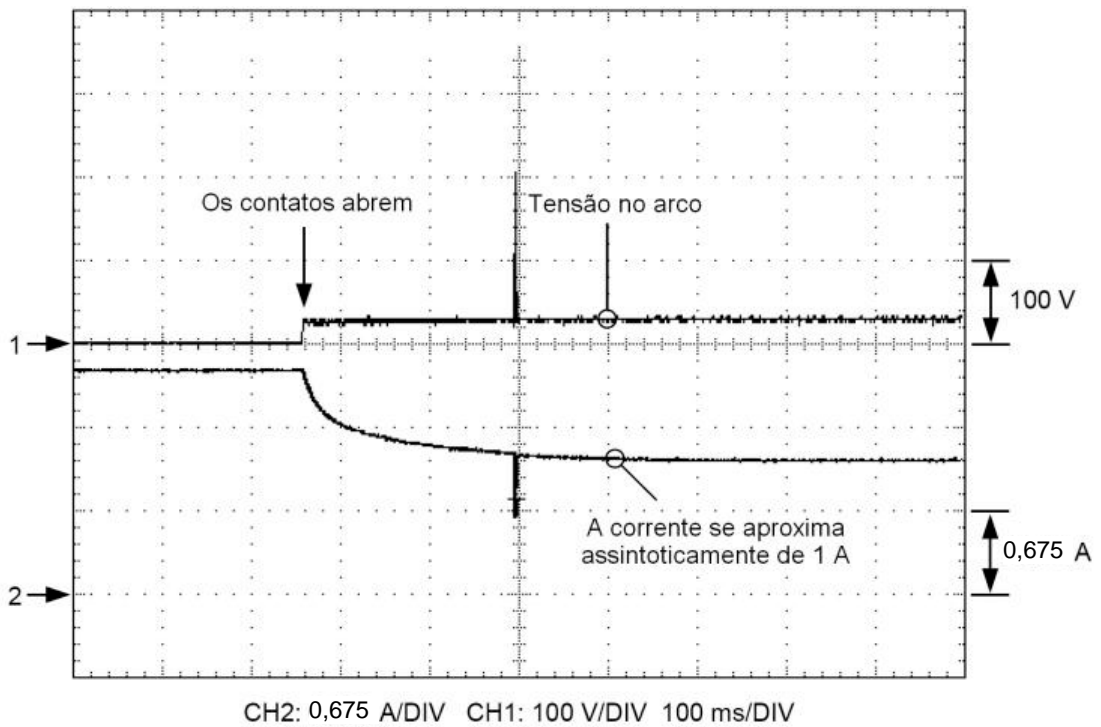


Figura 10: Tensão e Corrente no Contato Durante uma Interrupção com Falha de 1,8 Ampere Indutivo

Contato Protegido por um Diodo *Flyback*

Para reduzir a energia dissipada pelos contatos durante uma interrupção indutiva, devemos primeiro reconhecer uma importante diferença entre casos indutivos e resistivos: a carga indutiva armazena energia que tem de ser dissipada. Podemos tentar dissipar totalmente essa energia indutiva nas resistências do circuito usando um diodo *flyback*, conforme mostrado na Figura 11.

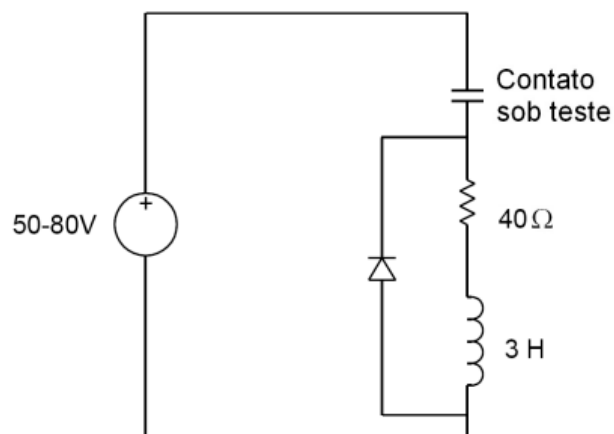


Figura 11: Circuito de Teste de Interrupção Indutiva com Diodo *Flyback*

Para que o contato faça uso do diodo *flyback*, a tensão no contato ainda tem de aumentar a partir de um valor próximo de zero até um valor imediatamente superior à tensão da fonte, para induzir a direção à frente na condução do diodo. Dessa forma, a corrente indutiva pode circular através do diodo. A Figura 12 mostra a corrente e a tensão resultantes no contato.

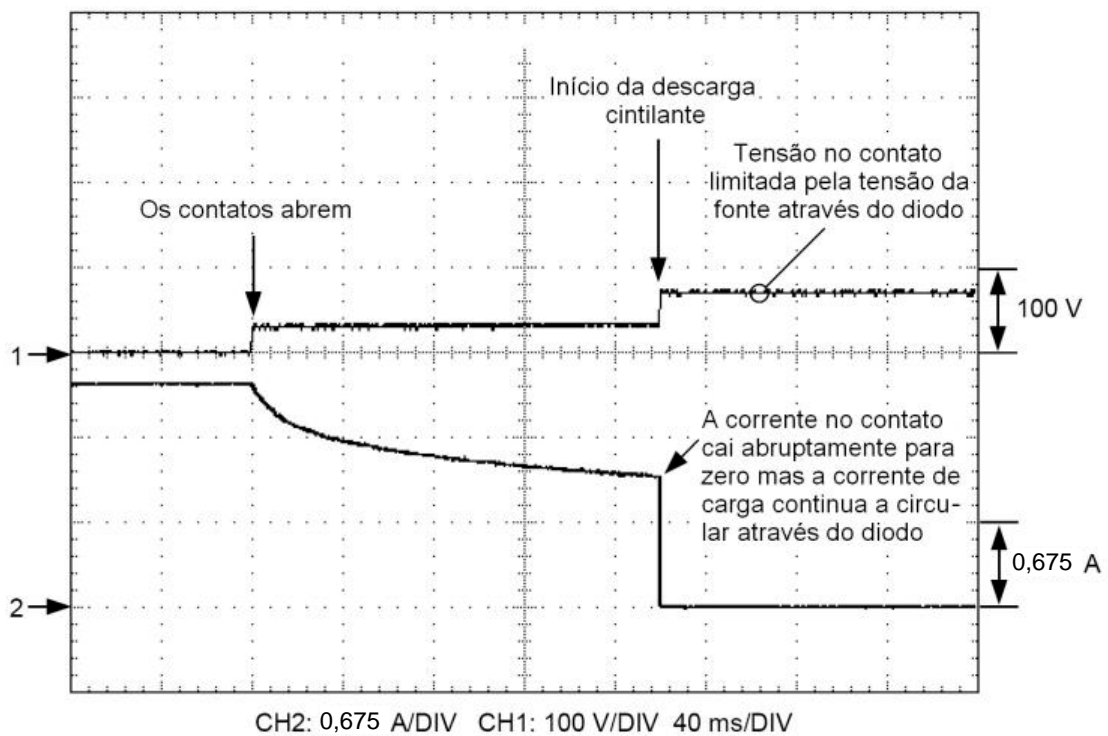


Figura 12: Corrente e Tensão do Contato para o Circuito da Figura 11

Um arco elétrico ainda é formado. Isto não é uma surpresa, uma vez que a análise de nosso circuito mostra que o diodo *flyback* não vai conduzir até que a tensão no contato ultrapasse a tensão de alimentação. Devido ao fato de a tensão de 30 volts desenvolvida pelo arco elétrico ser bem menor do que a tensão de alimentação, o contato ainda forma um arco. Entretanto, quando a corrente no arco cai abaixo de aproximadamente 1,1 ampere, o contato não pode mais sustentar um arco. Ele tem de efetuar a transição para a condição da descarga cintilante. Conforme vimos anteriormente, a descarga cintilante produz uma tensão no contato de aproximadamente 350 volts, suficiente para induzir a direção à frente na condução do diodo *flyback*. Assim que o diodo *flyback* começa a conduzir, a corrente no contato cai abruptamente para zero e a descarga cintilante acaba. Entretanto, a carga não é interrompida até que a corrente pare de circular através do diodo *flyback*. A duração dessa circulação depende da constante de tempo do indutor.

Uma vez que a descarga cintilante ocorreu somente durante um curto período de tempo, a energia gerada por ela é quase zero. A energia total dissipada é reduzida, talvez em 30 por cento, usando os totais do caso anterior de interrupção indutiva.

Contato Protegido por um Varistor

Em alguns casos, o diodo *flyback* não é admissível, seja devido a um problema de confiabilidade observado, ou porque ele atrasa a interrupção real da corrente de carga ao permitir que a corrente continue a circular por algum tempo. Nestes casos, podemos limitar a tensão no contato em um valor menor do que o da tensão da descarga cintilante, efetuando a conexão de um dispositivo não linear através dos contatos, tal como um MOV (*Metal Oxide Varistor*). Por exemplo, um MOV com uma tensão de corte de aproximadamente 250 volts limita a tensão no contato abaixo da tensão da descarga cintilante. Neste caso, o MOV dissipa toda a energia previamente dissipada nos contatos durante a descarga cintilante. Os contatos ainda dissipam a mesma energia durante o arco. Esta é a mesma situação que ocorreu com o diodo *flyback*, porém com um benefício adicional referente à proteção do contato contra sobretensões transitórias.

Embora seja liberada menos energia durante o processo do arco, tanto com o diodo *flyback* quanto com o MOV, nós não aumentamos de forma significativa a capacidade de

chaveamento do contato. A tensão de arco do contato ainda tem de ser suficiente para que a corrente do circuito seja baixa o suficiente para que haja o início da descarga cintilante. Se isto não ocorrer, a corrente não vai ser interrompida e os contatos serão destruídos. Em outras palavras, o diodo flyback ou o MOV podem aumentar o tempo de vida útil do contato quando do chaveamento de cargas dentro da capacidade nominal do contato, mas eles não estendem a capacidade nominal do contato.

Um outro problema em relação a confiar na descarga cintilante para ajudar na interrupção de cargas é que ela pode não ocorrer com alguns contatos. Os autores somente testemunharam a ocorrência da descarga cintilante com contatos relativamente pequenos, tais como os que são usados nos modernos relés de proteção. Quando foi usado um contato com espaçamento significativamente maior, a descarga cintilante não foi observada.

Contato Protegido por um Capacitor *Shunt*

Nós queremos evitar a formação do arco elétrico inicial e não queremos depender da descarga cintilante mesmo como parte do processo de interrupção. Parece que, se pudéssemos limitar a tensão no contato em um valor abaixo da tensão do arco, um arco elétrico poderia não ser desenvolvido. Conceitualmente, podemos atender a este fato efetuando a instalação de um capacitor em paralelo com os contatos, conforme mostrado na Figura 13.

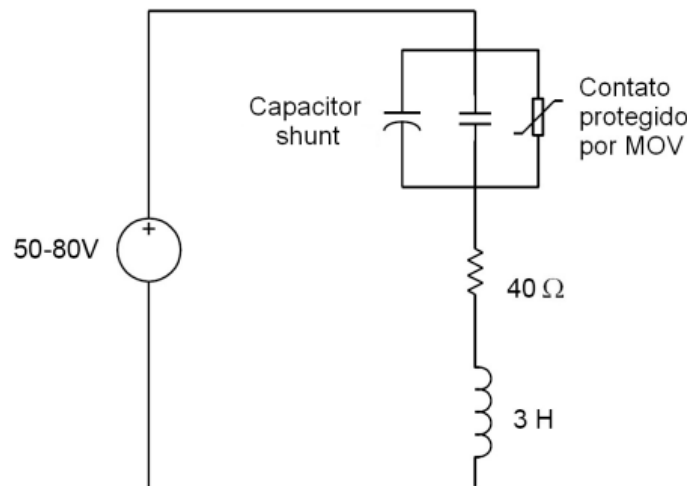


Figura 13: Circuito de Teste de Interrupção Indutiva com um Capacitor *Snubber* (Circuito de Amortecimento)

Quando os contatos se separam, a corrente de carga começa a carregar o capacitor. Se a taxa de aumento da tensão no capacitor for suficientemente baixa (se o capacitor for suficientemente grande), então os contatos que estão se separando poderão suportar esse aumento da tensão sem que ocorra *flashover*. Os circuitos que foram até aqui considerados são capazes de interromper em torno de 1,75 ampere indutivo, mas com algum arco. A seguir, vamos calcular a capacitância *shunt* necessária para interromper 1,75 ampere indutivo sem arco.

Os contatos que usamos se separam totalmente em torno de 1 milissegundo. Quando totalmente aberto, o contato pode suportar aproximadamente 3000 volts. Considerando uma taxa de separação constante, isto sugere que a tensão que ele suporta aumenta em torno de 3 volts por microssegundo quando os contatos estão se separando. Portanto, o capacitor *shunt* tem de limitar a taxa de aumento da tensão no contato em menos de 3 milhões de volts por segundo enquanto estiver sendo carregado com 1,75 ampere.

$$i = C \, dv/dt, \text{ logo}$$

$$C = \frac{i}{(dv/dt)} = \frac{1,75 \text{ A}}{(3 \text{ MV/s})} = 0,6 \, \mu\text{F}$$

Para encontrar a tensão de pico atingida pelo capacitor, iguale a energia armazenada no indutor de carga com a energia eventualmente armazenada no capacitor:

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}CV^2 \text{ logo}$$

$$V = I\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Onde V é a tensão de pico atingida pelo capacitor, I é a corrente de carga circulante antes da abertura do contato, L é a indutância da carga e C é o valor do capacitor *shunt*.

Substituindo 3 H, 0,6 μF , e 1,75 ampere, temos:

$$V = 3,9 \text{ kV}$$

Evidentemente, precisamos limitar a elevação da tensão no capacitor. Isto foi feito instalando um MOV em paralelo com o contato e com o capacitor. Por sorte, muitos contatos de relés de proteção são protegidos por um MOV. Neste caso, o MOV limita a tensão nos contatos em aproximadamente 450 volts.

Para testar esta teoria, construímos o circuito da Figura 13. A Figura 14 mostra a tensão e a corrente no contato durante uma interrupção indutiva de 1,75 ampere. Nenhum arco foi observado. O capacitor é carregado muito rapidamente até a tensão de corte do MOV. O MOV limita em aproximadamente 450 volts, que força em torno de -450 volts no indutor. Essa tensão negativa elevada provoca a queda quase linear da corrente no indutor para zero.

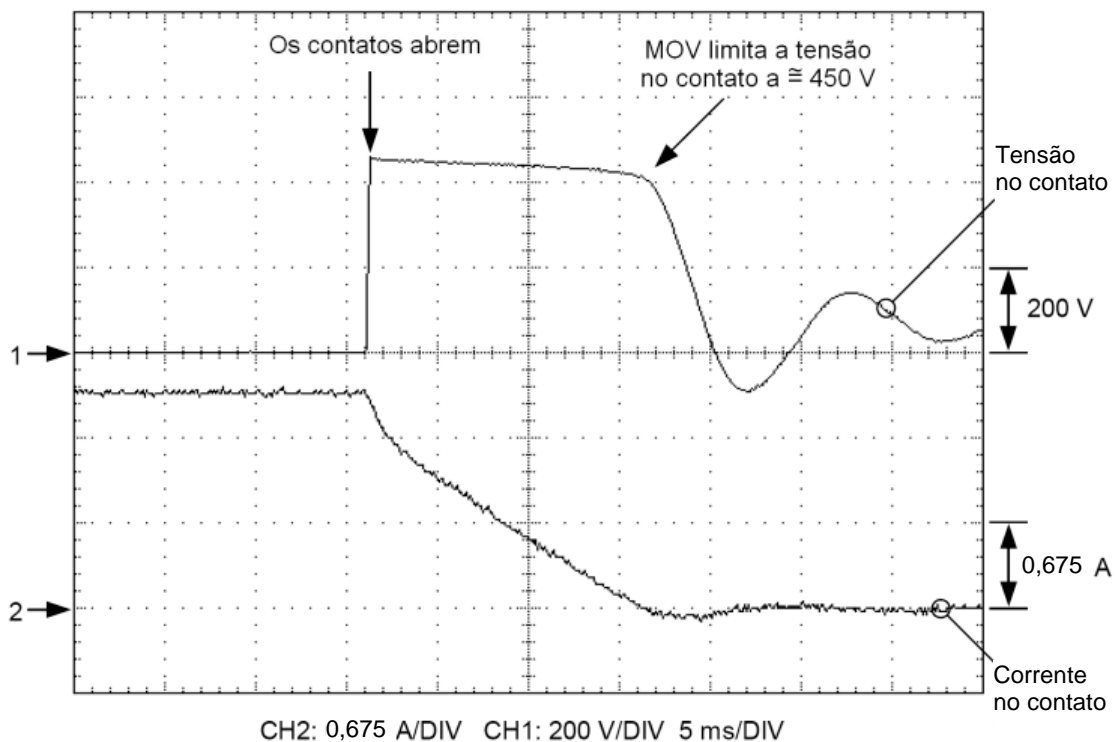


Figura 14: Tensão e Corrente no Contato Durante uma Interrupção Indutiva de 1,75 Ampere com um Capacitor *Shunt* de 0,6 μF

A Figura 15 detalha o momento em que os contatos se separam. Novamente, nenhum arco é evidente. A corrente de carga carrega o capacitor a uma taxa muito próxima da prognosticada de três milhões de volts por segundo, até que ele atinja a tensão limite do MOV.

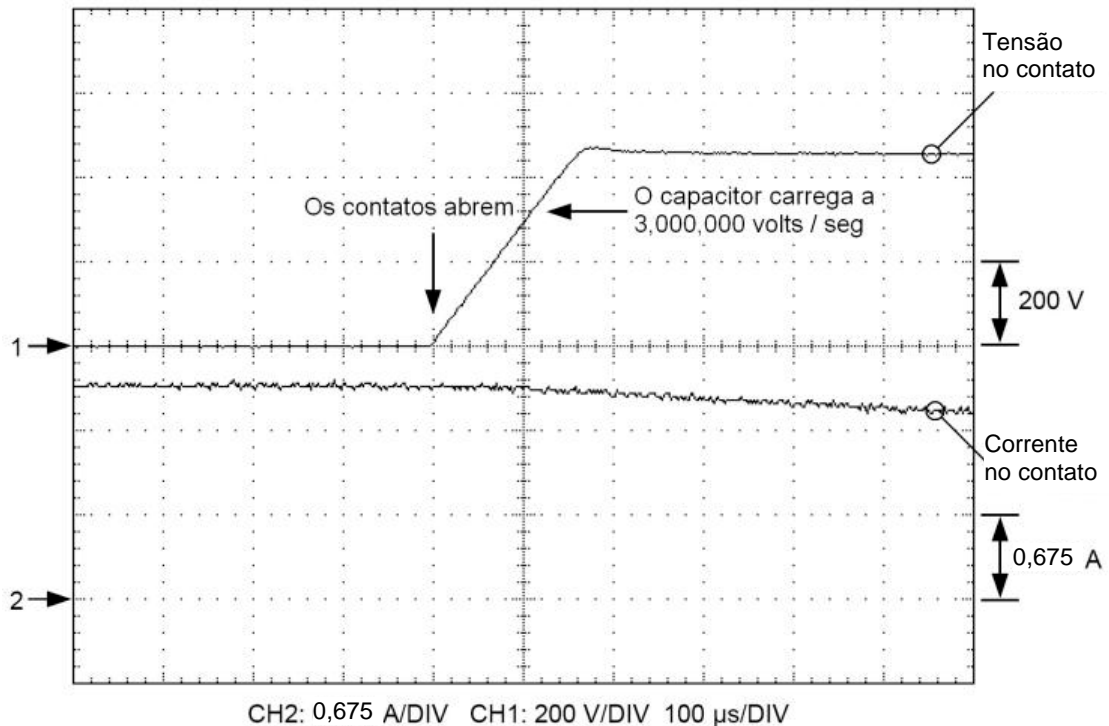


Figura 15: Tensão e Corrente no Contato Durante uma Interrupção Indutiva de 1,75 Ampere com um Capacitor *Shunt* de 0,6 μF

Teoricamente, este método pode ser usado com correntes muito maiores. Entretanto, à medida que o valor do capacitor aumenta, torna-se mais provável a ocorrência de problemas nos circuitos de controle *dc*. Conforme foi visto na primeira seção deste *paper*, o capacitor pode causar danos aos contatos quando o contato fecha. Quando o circuito é inicialmente energizado, seja pelo fechamento de uma chave de interrupção ou de um disjuntor no painel, o capacitor permite a circulação da corrente no contato aberto durante um certo tempo. Dependendo da carga, isto pode não ser admissível. Finalmente, para frequências elevadas, tais como as que são observadas freqüentemente nos circuitos típicos de controle *dc*, durante operações de chaveamento, o capacitor pode evidenciar-se como um curto-circuito.

O Contato “Hybrid”

Nós queremos instalar um dispositivo em paralelo com os contatos que evite que a tensão no contato aumente e atinja o valor da tensão de arco até que os contatos tenham se separado o suficiente; porém, não queremos que esse dispositivo danifique os contatos quando eles fecharem e que não se apresente como um curto-circuito para frequências elevadas.

A Referência [1] descreve um circuito que usa um transistor de potência para desviar a corrente dos contatos que estão se separando. O transistor é controlado por um sinal que deve ser coordenado em tempo para coincidir com a separação dos contatos. Quando este circuito for usado num relé de proteção, o sinal tem também de atravessar uma barreira de isolamento para preservar a segurança da isolamento. O circuito mostrado abaixo representa um outro método e é descrito com mais detalhes na patente U.S. 5.652.688.

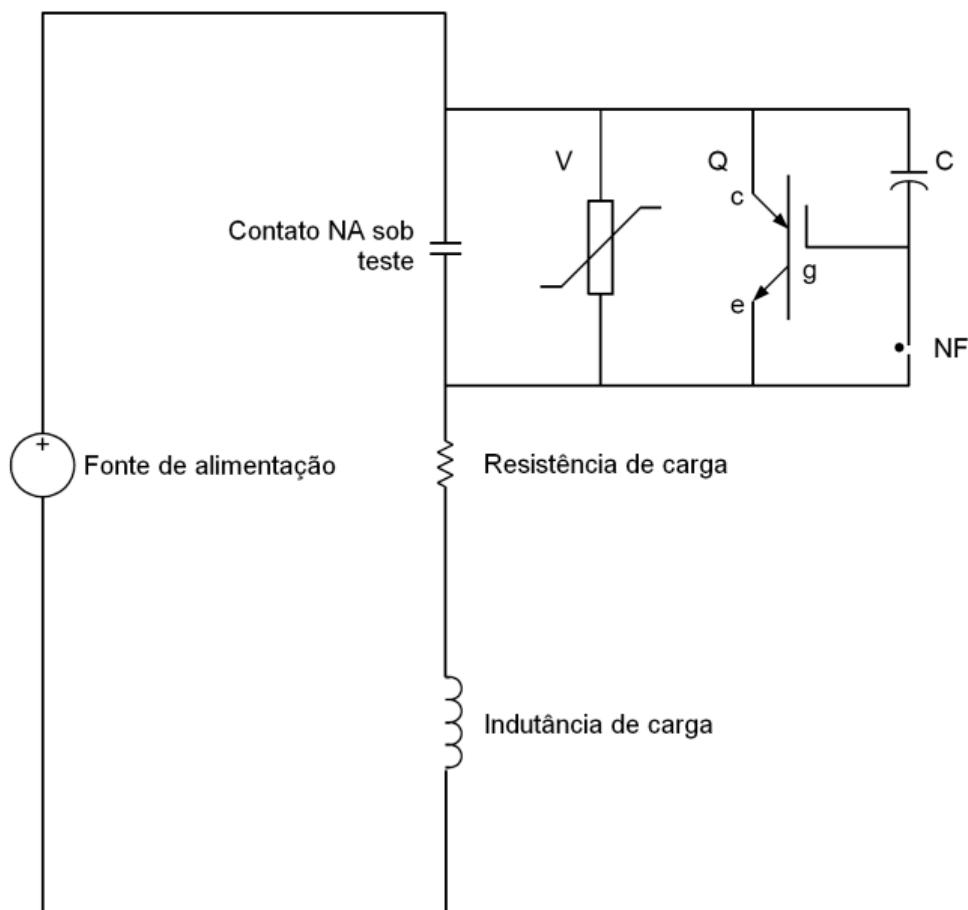


Figura 16: Contato *Hybrid*: uma Conexão Paralela dos Contatos Metálico e de Estado Sólido

Na Figura 16, a corrente de carga aciona o transistor e o contato que está sendo protegido propicia a temporização para desligar o transistor. Portanto, o sinal de controle do transistor não atravessa a barreira de isolamento (que é muito cara e cuja execução é muito complexa), e a temporização é automaticamente compatibilizada com o contato que está sendo protegido.

O contato que está sendo considerado é um do tipo C. Nós usamos o contato normalmente aberto para chavear a corrente de carga. Quando os contatos normalmente abertos se separam, a corrente de carga é forçada a circular através do capacitor C e em direção à porta g do transistor Q. Q começa a conduzir quando sua porta é carregada com um valor aproximado de 6 volts. É necessário aproximadamente 5 nC para carregar a porta de Q em 6 volts. Esta carga passa através do capacitor C, e também carrega C. A tensão nos contatos normalmente abertos é a soma da tensão na porta de Q e da tensão através de C. Entretanto, queremos limitar a tensão gerada em C quando ele conduz a carga para a porta de Q. Escolhemos um valor de 2,2 nF para C. Isto gera $5 \text{ nC} / 2,2 \text{ nF} = 2,3 \text{ volts}$ em C, e um total de $2,3 \text{ volts} + 6 \text{ volts}$ ou 8,3 volts nos contatos que estão se separando.

Para correntes que produzem uma tensão de arco maior do que 8,3 volts, os contatos normalmente abertos nunca vão desenvolver um arco. Ao invés disso, o transistor Q é acionado e conduz quando os contatos normalmente abertos se separam, e a tensão no contato é limitada em aproximadamente 8,3 volts. Quando os contatos tiverem se separado completamente, o contato normalmente fechado fecha e descarrega a porta do transistor Q. Isto desenergiza Q, o que força a corrente de carga a circular através do MOV V. O MOV é selecionado para gerar em torno de 370 volts quando a corrente passa por ele. Isso gera aproximadamente -370 volts no indutor, e força a corrente de carga para zero.

Quando o contato normalmente aberto está aberto, o contato normalmente fechado curto-circuita a porta do transistor para o emissor, de forma que o transistor é mantido solidamente

em *off*. Ele não pode ser acionado até que o contato seja fechado novamente. Durante a energização do circuito, o capacitor de 2,2 nF não conduz carga suficiente para alimentar mesmo a mais resistiva das cargas.

Inicialmente, testamos este circuito com a carga indutiva de 1,75 ampere descrita anteriormente. A Figura 16 mostra a corrente e tensão resultantes. A tensão no contato é limitada em torno de 370 volts. Essa tensão elevada força a corrente de carga indutiva para zero.

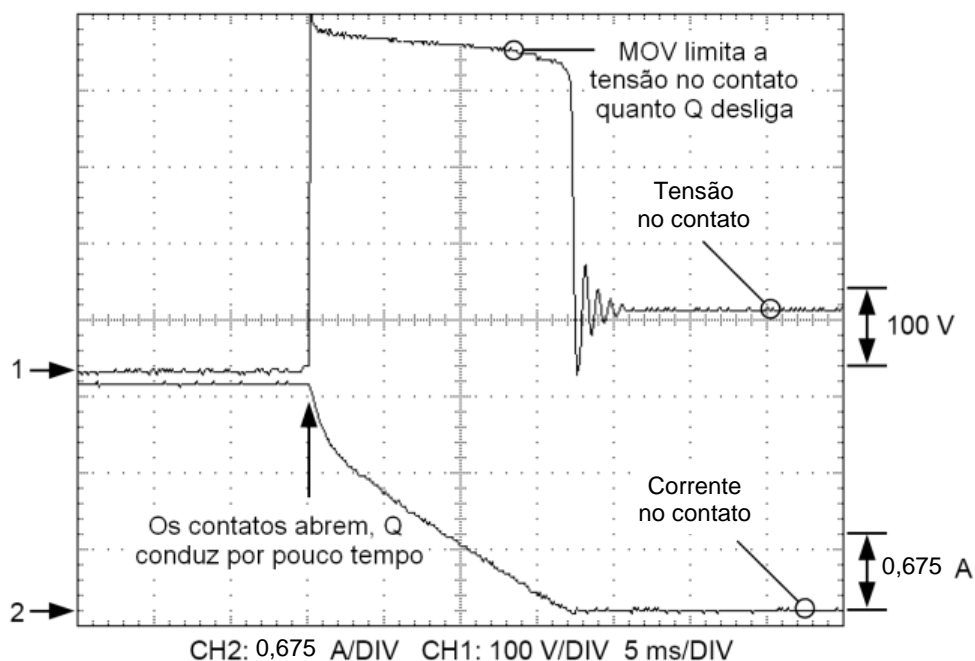


Figura 17: Tensão e Corrente no Contato Durante uma Interrupção Indutiva de 1,75 Ampere

A Figura 17 mostra o processo completo da interrupção. A Figura 18 detalha o instante em que os contatos se separam.

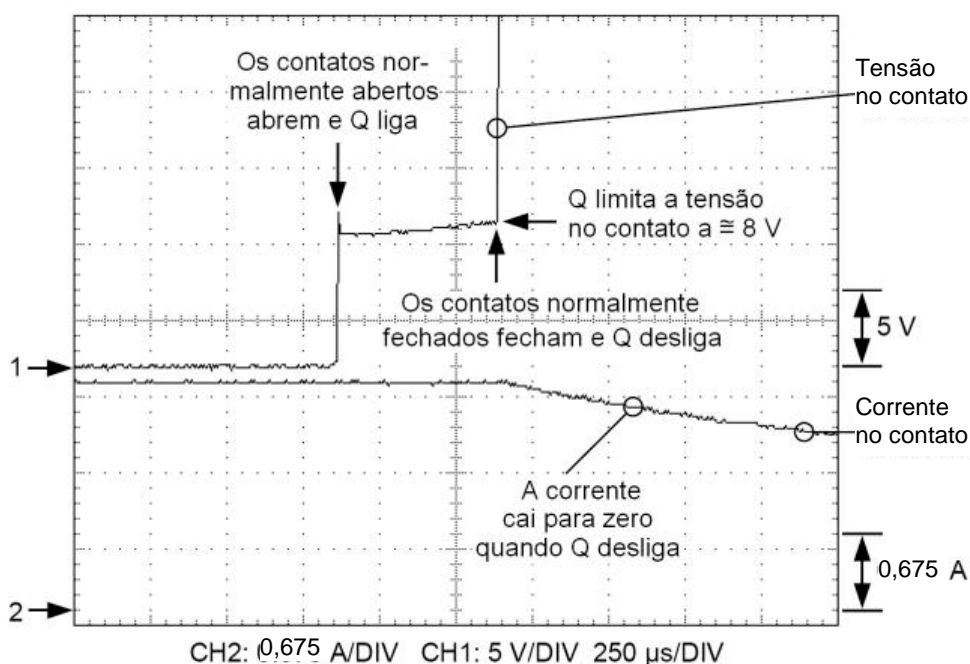


Figura 18: Tensão e Corrente no Contato à Medida que os Contatos se Separam Durante uma Interrupção Indutiva de 1,75 Ampere

Na Figura 18, a tensão no contato aumenta abruptamente de quase zero para 8 volts quando os contatos se separam. O transistor de potência Q é acionado e limita a tensão no contato em aproximadamente 8 volts. Após 500 microssegundos, os contatos normalmente fechados fecham, o que desenergiza Q. A corrente de carga é então forçada a circular através do MOV, o que provoca a elevação rápida da tensão no contato e força a corrente a começar a cair para zero.

Em seguida, testamos o circuito mostrado na Figura 16 para 9 amperes e 21 amperes. A Figura 19 e a Figura 20 mostram as formas de onda resultantes, novamente detalhando a região do início da separação dos contatos.

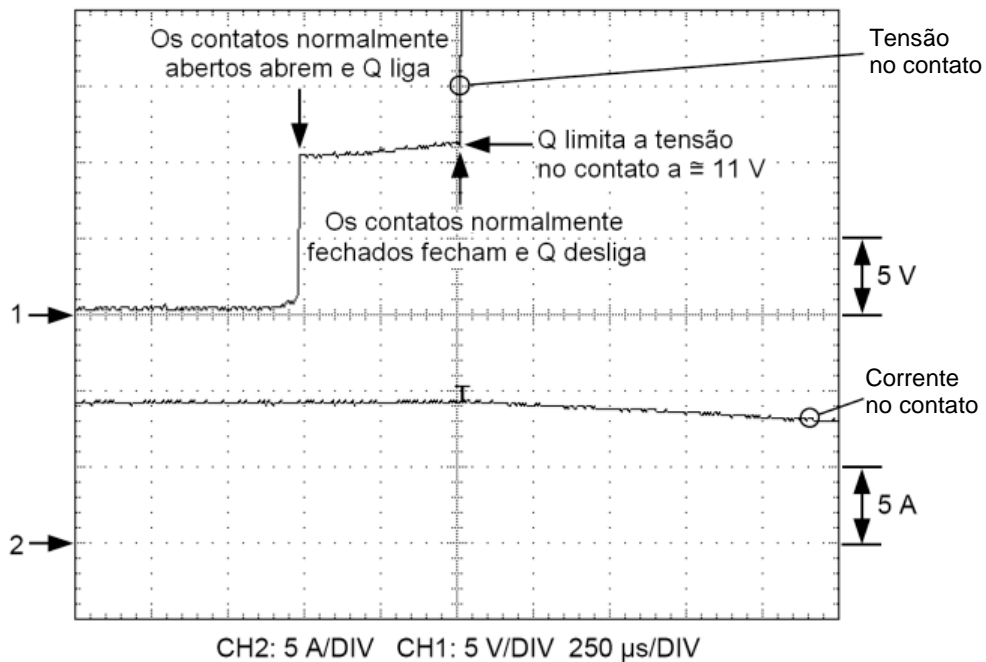


Figura 19: Tensão e Corrente no Contato à Medida que os Contatos se Separam Durante uma Interrupção Indutiva de 9 Ampere

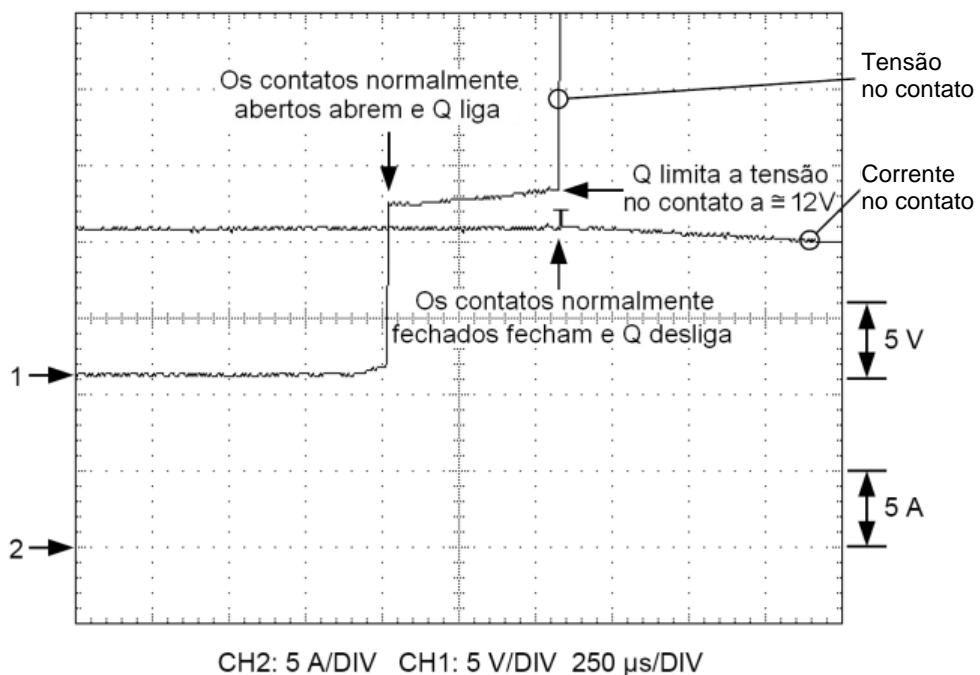


Figura 20: Tensão e Corrente no Contato à Medida que os Contatos se Separam Durante uma Interrupção Indutiva de 21 Ampere

Observe que essas interrupções resultaram essencialmente em zero de energia dissipada nos contatos, devido à não ocorrência de arco. A soma da energia contida na carga indutiva e fornecida pela fonte de alimentação é dissipada no MOV e na resistência da carga. Conseqüentemente, os contatos apresentam muito pouco desgaste. Nós usamos este circuito para interromper uma carga indutiva de 10 amperes a 125 Vdc, 10.000 vezes, sem ocorrer danos visíveis aos contatos.

Este arranjo do circuito é limitado pela característica de resistência negativa do arco elétrico e característica de resistência positiva do transistor Q da Figura 16. À medida que a corrente de carga aumenta, a tensão no arco diminui e a tensão de condução de Q aumenta. Quando a tensão no arco diminui para um valor menor do que o da tensão de condução de Q, esse circuito pode não evitar a ocorrência de algum arco.

Podemos nos assegurar de que isso não ocorra adicionando um componente ao circuito da Figura 16. A Figura 21 mostra o circuito com uma bateria fotovoltaica adicionada, (*photovoltaic pile – PV*).

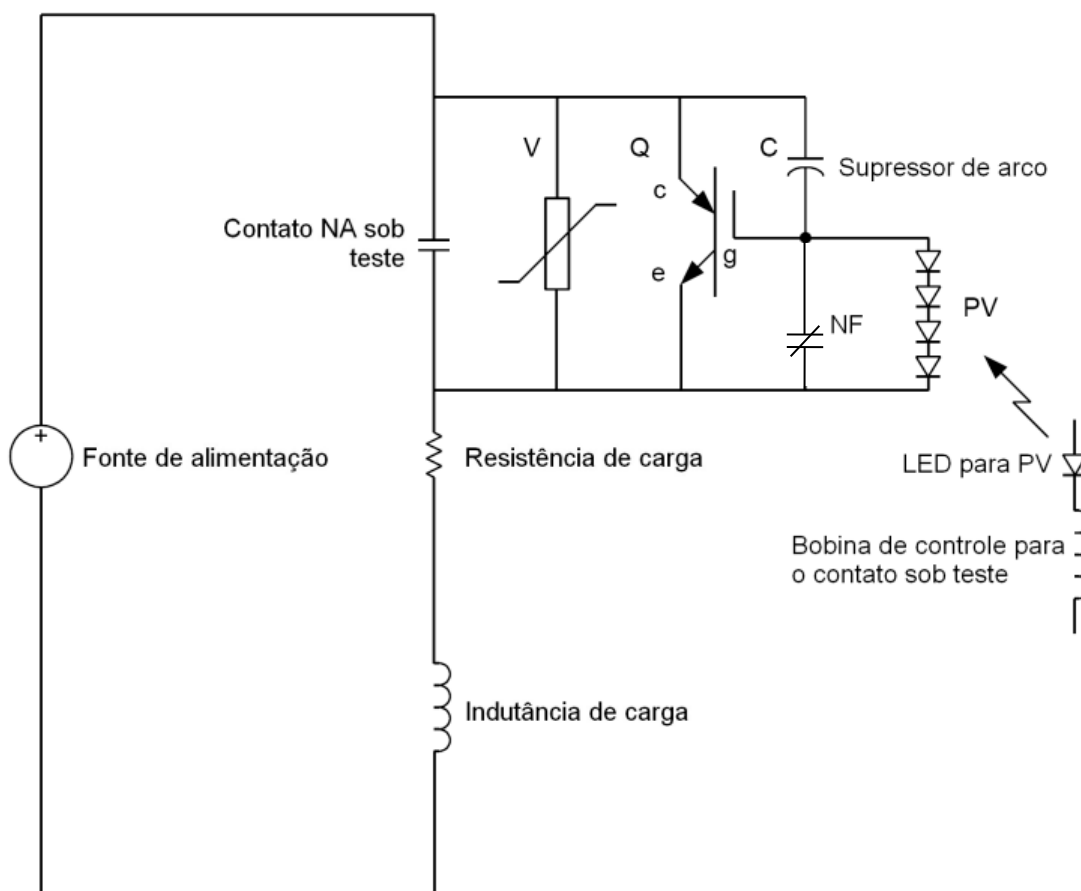


Figura 21: Contato Hybrid Melhorado com uma Bateria Fotovoltaica

O LED que ilumina a bateria fotovoltaica é instalado em série com a bobina de controle do contato. A bateria fotovoltaica é acionada quando a bobina de controle do contato é energizada. Quando a bobina de controle é energizada, o contato normalmente fechado libera a porta do transistor e a bateria fotovoltaica começa a carregar a porta e o capacitor C. A bateria fotovoltaica pode gerar em torno de 5 volts para aproximadamente 10 microamperes. O carregamento da porta de Q e C em 5 volts requer aproximadamente 20 nC, que é fornecido por uma fonte de 10 microamperes em 2 milissegundos.

Quando a bobina de controle é desenergizada, os contatos normalmente abertos abrem, e a corrente de carga circula através de C para a porta de Q, como antes. Entretanto, a porta já está em 5 volts e C está carregado com 5 volts negativos. Para carregar a porta de 5 volts para 6 volts, somente é necessário adicionar aproximadamente 2 nC através de C. Isto diminui a

carga de C de 5 volts negativos para aproximadamente 4 volts negativos. Isto, adicionado aos 6 volts da porta de Q, fornece uma tensão total no contato de somente 2 volts, comparados aos quase 12 volts da Figura 20.

A Figura 22 detalha o instante em que os contatos normalmente abertos da Figura 21 começam a se separar. Observe que a tensão no contato é limitada em torno de 2 volts enquanto os contatos estão se separando e Q está conduzindo. A Figura 22 detalha uma interrupção de 20 amperes. Nós usamos este arranjo de circuito para interromper cargas indutivas maiores do que 100 amperes através do mesmo contato do relé de proteção usado ao longo deste *paper*.

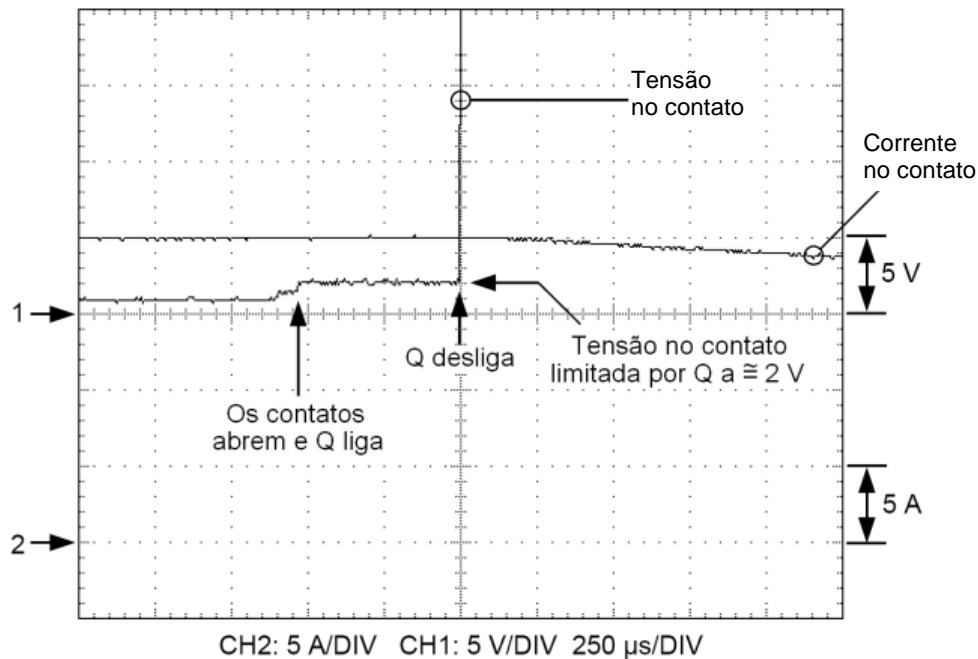


Figura 22: Tensão e Corrente no Contato à Medida que os Contatos se Separam Durante uma Interrupção Indutiva de 20 Ampere

CONCLUSÕES

1. Os relés *reed* podem ser danificados por cargas capacitivas aparentemente pequenas. Para assegurar que os capacitores de supressão de surto, ou mesmo a capacitância de dispersão da fiação, não danifiquem os relés *reed*, insira uma resistência em série com o contato, e próxima a ele, para limitar as correntes de pico de surto de chaveamento.
2. O processo de interrupção de contatos pequenos, tais como os que são usados nos modernos relés de proteção, é influenciado pela descarga cintilante. A transição do arco para a descarga cintilante não costuma se repetir muito, nem sempre se pode prever e não é muito estável.
3. As tentativas para aumentar a capacidade de interrupção de contatos pequenos, através da inserção de componentes externos como diodos *flyback*, MOVs ou capacitores de amortecimento (*snubbing capacitors*), podem resultar em uma redução nos danos aos contatos para determinadas correntes interrompidas. Entretanto, esses componentes adicionados não podem, na verdade, estender a capacidade de chaveamento desses contatos.
4. Para ter certeza de que uma carga indutiva vai ser interrompida por um contato metálico não especificado para chavear tal carga, evite a formação de um arco elétrico desviando a corrente dos contatos que estão se separando.

REFERÊNCIAS

- [1] Jeff Roberts and Tony Lee, “Measuring and Improving DC Control Circuits,” Proceedings of the 25th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 13–15, 1998.
- [2] James D. Cobine, *Gaseous Conductors: Theory and Engineering Applications*, Dover Publications, Inc. New York, 1958.
- [3] IEEE Standard 100-1992, *The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, Fifth Edition, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Definition of Negative-Resistance Device, p. 840.

BIOGRAFIAS

Dr. Schweitzer nasceu em Evanston, Illinois, USA, em 1947. Ele recebeu o título de Bacharel e de Master em engenharia elétrica da Purdue University. Recebeu o certificado de Ph.D. da Washington State University após a conclusão de sua tese sobre relés de proteção digitais.

Dr. Schweitzer continuou sua pesquisa sobre relés de proteção digitais durante o período em que fez parte do corpo docente da faculdade de engenharia elétrica da Ohio University e Washington State University. A pesquisa abrangeu os aspectos teóricos e práticos, e demonstrou a viabilidade e a praticidade das técnicas digitais para proteção de sistemas e equipamentos elétricos de potência.

Em 1982, Dr. Schweitzer fundou a Schweitzer Engineering Laboratories, em Pullman, Washington, para desenvolver e fabricar relés de proteção digitais, e produtos e serviços associados. Hoje, a SEL é uma empresa constituída de funcionários-proprietários que atende a indústria de energia elétrica em todo o mundo e tem o certificado de padrão de qualidade internacional ISO-9001. Os equipamentos da SEL estão instalados e operando em tensões que vão de 5 kV a 765 kV, para proteção de alimentadores, motores, transformadores, bancos de capacitores, linhas de transmissão e outros equipamentos de potência.

Dr. Schweitzer é reconhecido como o pioneiro da proteção digital, e detém o título de Fellow do “Institute of Electrical and Electronic Engineers” (IEEE), o qual é concedido a menos de 1% dos membros do IEEE.

Ele escreveu diversos artigos técnicos nas áreas de projetos de relés de distância, filtragem para relés de proteção, confiabilidade e testes de relés de proteção, localização de faltas em linhas aéreas, proteção de motores de indução, projeto de elementos direcionais, dinâmica de elementos de sobrecorrente e sensibilidade de relés de proteção.

Dr. Schweitzer detém mais de vinte patentes relativas à proteção, medição, monitoração e controle de sistemas elétricos de potência.

Tony J. Lee recebeu o título de B.S. em engenharia elétrica da Washington State University em 1987. O Sr. Lee trabalhou para a Texas Instruments em Dallas, Texas, de 1987 a 1991, quando foi para a Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro de desenvolvimento de hardware. Atualmente, ele ocupa a posição de Gerente de Engenharia de Transmissão na SEL. O Sr. Lee detém duas patentes nos USA e diversas patentes em outros países relativas à supressão de arco, e tem diversas patentes cujos processos estão em andamento.