

## 1.3.7 Como sensoriar o isolamento elétrico em um BMS

Continuamos nossa investigação sobre a primeira área de requisitos de um Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) — sensoriamento e controle de alta tensão. Vamos abordar uma função de segurança crítica: sensoriar uma **falha de aterramento**, mais formalmente conhecida como **falha de isolamento**.

A principal preocupação é a segurança de qualquer pessoa que possa entrar em contato com o veículo. Devemos fazer a pergunta: é seguro para um técnico de manutenção, um socorrista ou um ocupante do veículo tocar simultaneamente em um dos terminais externos do pacote de bateria de alta tensão e no chassi metálico do veículo?

Isso contrasta nitidamente com o sistema elétrico padrão de 12 volts em um veículo convencional. Em um sistema de 12V, o terminal negativo da bateria é intencionalmente conectado diretamente ao chassi, que então serve como um caminho de aterramento comum, economizando uma quantidade significativa de fiação. Isso é seguro porque 12 volts não é um potencial perigoso. No entanto, o mesmo não pode ser feito com um pacote de bateria de alta tensão, que pode operar a centenas de volts. Para prevenir um grave risco de choque elétrico, o sistema de alta tensão **deve estar completamente isolado eletricamente** do chassi do veículo em todos os momentos.



# Definindo o Padrão para um Isolamento Suficiente

O requisito oficial para o que constitui um isolamento "seguro" é ditado por regulamentações governamentais, como a **Norma Federal de Segurança para Veículos Automotores (FMVSS)** nos Estados Unidos.

A norma estabelece que o isolamento é considerado suficiente se, durante um curto-circuito direto entre o terminal positivo e o terminal negativo da bateria e o chassi, o fluxo de corrente resultante for **inferior a 2 miliamperes (mA)**. Este limiar é baseado no nível de corrente que se acredita estar próximo do limite letal para um ser humano.

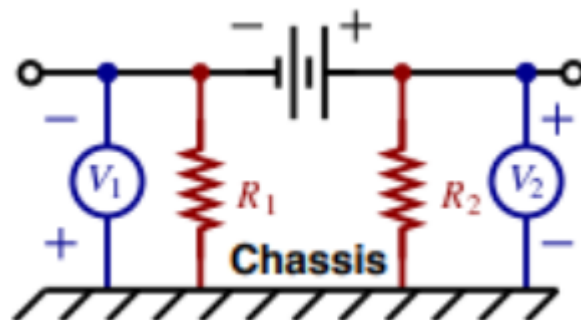
Usando a Lei de Ohm (Resistência = Tensão / Corrente), podemos traduzir este limite de corrente em uma resistência mínima necessária. A **resistência de isolamento ( $R_i$ )** do pacote de bateria deve ser maior que a tensão do pacote ( $V_b$ ) dividida por 0,002 Amperes. Isso se simplifica para a fórmula de segurança crítica:

$$R_i > 500 \times V_b$$

Por exemplo, um pacote de bateria de 400V deve manter uma resistência de isolamento superior a 200.000 ohms (200 k $\Omega$ ) para ser considerado seguro.

## Modelando o Problema: O Circuito de Resistência de Isolamento

Para conceber um método para medir essa resistência de isolamento, primeiro modelamos a situação com um diagrama esquemático. A bateria de alta tensão está na parte superior, e o chassi do veículo está na parte inferior.



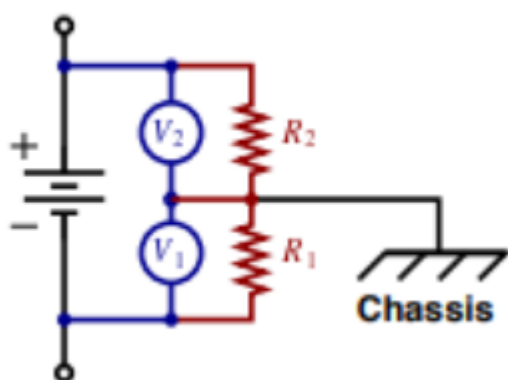
Os caminhos de fuga elétrica desconhecidos e não intencionais entre a bateria e o chassi são modelados como dois resistores:

- **R1:** A resistência entre o terminal negativo da bateria e o chassi.
- **R2:** A resistência entre o terminal positivo da bateria e o chassi.

Idealmente, tanto  $R_1$  quanto  $R_2$  deveriam ser infinitos. Na realidade, alguma fuga minúscula sempre existirá devido a fatores como umidade e sujeira. O pior caminho é aquele com a menor resistência. Portanto, o objetivo do BMS é medir a **resistência de isolamento geral,  $R_i$** , que é definida como o *mínimo* de  $R_1$  e  $R_2$ :  $R_i = \min(R_1, R_2)$ .

## 0 Procedimento de Medição: Uma Análise Passo a Passo

O BMS segue um procedimento inteligente e de múltiplos passos para calcular essa resistência desconhecida.



### Passo 1: Medição de Tensão Inicial para Identificar o Caminho de Menor Resistência

Primeiro, o BMS usa um voltímetro de alta impedância para medir as duas tensões passivas no circuito:

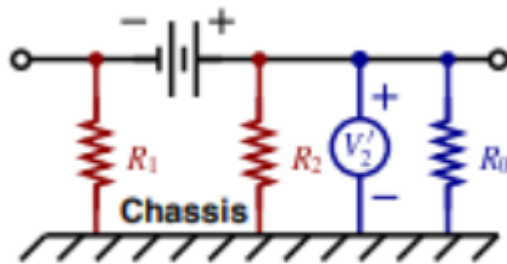
- **V1:** A tensão entre o terminal negativo e o chassi.
- **V2:** A tensão entre o terminal positivo e o chassi.

Neste estado inicial,  $R_1$  e  $R_2$  formam um simples divisor de tensão. A menor das duas tensões medidas ( $V_1$  ou  $V_2$ ) corresponde à menor das duas resistências ( $R_1$  ou  $R_2$ ), que é a resistência de isolamento ( $R_i$ ) que precisamos encontrar.

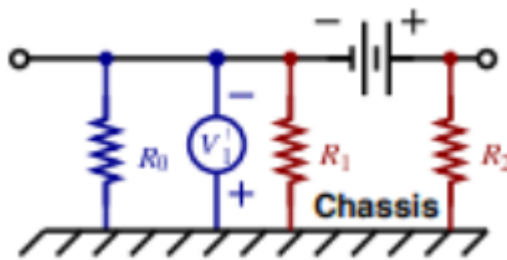
### Passo 2: Sondando Ativamente o Circuito com uma Resistência Conhecida

Em seguida, o BMS sonda ativamente o circuito. Ele fecha temporariamente um interruptor de transistor para conectar um resistor conhecido e de alto valor ( **$R_0$** ) ao circuito.

- Se  **$V_1 < V_2$**  (o que significa que  $R_1$  é o caminho de menor resistência), o BMS conecta  $R_0$  entre o terminal **positivo** e o chassi. Em seguida, ele mede novamente a tensão no terminal positivo, agora chamada de  **$V_2'$** .



- Se  $V_2 < V_1$  (o que significa que  $R_2$  é o caminho de menor resistência), o BMS conecta  $R_0$  entre o terminal **negativo** e o chassis. Em seguida, ele mede novamente a tensão no terminal negativo, agora chamada de  $V_1'$ .



### Passo 3: Cálculo da Resistência de Isolamento

Aplicando a Lei das Correntes de Kirchhoff e a Lei de Ohm ao circuito recém-formado, o BMS pode derivar uma equação que relaciona os valores conhecidos ( $R_0$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ) e o valor recém-medido ( $V_1'$  ou  $V_2'$ ) ao único valor desconhecido ( $R_1$  ou  $R_2$ ). Após a manipulação algébrica, o BMS resolve para a resistência de isolamento desconhecida.

- Se estiver resolvendo para  $R_1$ , a fórmula final é:  $R_1 = R_0 \times ((V_2 - V_2') \times (1 + (V_1/V_2))) / V_2'$
- Se estiver resolvendo para  $R_2$ , a fórmula final é:  $R_2 = R_0 \times ((V_1 - V_1') \times (1 + (V_2/V_1))) / V_1'$

Uma vez que o valor da resistência de isolamento ( $R_i$ ) é calculado, o BMS o compara com o limiar de segurança ( $500 \times V_b$ ). Se a resistência medida for maior que o limiar, o sistema está seguro. Se não, uma falha é declarada.