

# Simulação da proteção contra perda de sincronismo no solidThinking Embed

Carolina Gonçalves Santos | Luan Pertele Carlette

GT2 Tecnologia, 2018

Tel: +55 (21) 3733-4167

[comercial@gt2.com.br](mailto:comercial@gt2.com.br)

---

## Resumo

Este artigo tem como objetivo demonstrar a implementação no solidThinking Embed da função de proteção de geradores síncronos contra a perda de sincronismo (ANSI 78). A operação do relé será, ainda, simulada junto a um gerador, no qual será aplicado um afundamento de tensão. Assim, serão constatadas a identificação do defeito e a atuação da proteção no envio de um sinal de abertura do disjuntor ao qual o relé está associado.

---

## Introdução

Os sistemas elétricos de potência são suscetíveis a falhas em diversos pontos, e até mesmo determinadas condições de carregamento podem representar risco de danos. Assim, para garantir seu funcionamento de maneira adequada, de forma que a demanda de energia elétrica seja suprida mantendo-se a integridade física dos equipamentos, é essencial identificar essas condições e, se necessário, desligar partes do sistema.

Esse papel é realizado pelos sistemas de proteção, cujos componentes principais são relés que monitoram, em sua maioria, correntes e/ou tensões. A partir da comparação dessas grandezas ou de combinações delas com valores de referência, os relés detectam se a condição de operação está fora do normal e, sendo esse o caso, podem enviar alarmes para o operador ou comandos de abertura ou fechamento diretamente para os disjuntores aos quais estão associados. Dessa forma, o defeito pode ser isolado e o(s) equipamento(s) desligados, evitando ou minimizando danos ao sistema.

Além disso, a proteção está intimamente relacionada com o porte do equipamento afetado pela falha, uma vez que quanto maior o equipamento, mais custosas tendem a ser sua manutenção e sua indisponibilidade. Os geradores síncronos, um dos componentes mais importantes dos sistemas de potência, apresentam complexos esquemas de proteção com relés que abrangem diversos tipos de defeitos.

A fim de ajustar corretamente os parâmetros de cada relé, além de realizar estudos elétricos de diferentes naturezas, é necessário simular a atuação da proteção juntamente aos outros equipamentos do sistema. A ação desse sistema tem uma característica fortemente *booleana* e a representação em blocos se mostra, então, uma alternativa conveniente para sua simulação, uma vez que o defeito é isolado mediante o envio de comandos de fechamento e/ou abertura de chaves seccionadoras e disjuntores.

Nesse contexto, o solidThinking Embed se apresenta como um *software* de modelagem ideal para implementação de sistemas de proteção. Pela complexidade e porte dos geradores síncronos, a simulação de suas funções torna-se especialmente interessante, de forma que o relé de perda de sincronismo (78) foi selecionado para implementação nesse ambiente.

## Perda de sincronismo

A perda de sincronismo em um gerador ocorre quando algum defeito provoca a perda do acoplamento magnético entre os enrolamentos de armadura e de campo, ou seja, quando a velocidade de rotação do gerador difere da velocidade nominal durante um determinado tempo. Esse tempo crítico varia de acordo com as características do gerador e do ponto de operação inicial, e o defeito pode ter diferentes origens, como uma subtensão decorrente de curto-circuito, uma perda de excitação ou reduções na capacidade de transmissão. A Figura 1 apresenta o comportamento da corrente e tensão terminais do gerador durante a perda de sincronismo causada por uma perda de excitação ocorrida aos 2s.

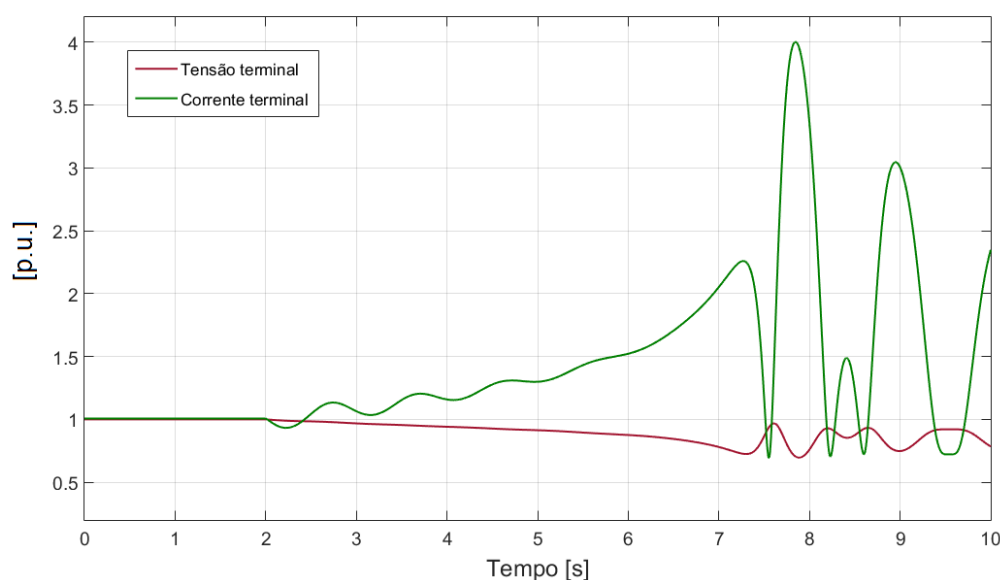


Figura 1 – Tensão e corrente terminais na perda de sincronismo.

Caso o gerador não seja desligado ao perder o sincronismo, os enrolamentos são submetidos a estresses e podem surgir correntes induzidas no rotor, que produzem torques pulsantes, além de ressonâncias mecânicas que podem danificar a máquina e o eixo da turbina. Assim,

é essencial identificar essa condição e, para reduzir a probabilidade de danos, retirar a máquina do sistema [1].

## Relé 78

A fim de detectar a perda de sincronismo, o relé 78 monitora o lugar da impedância aparente nos terminais da máquina, que é representado como um ponto no plano de impedâncias R-X. Dessa forma, a característica de atuação dessa proteção é traçada no mesmo plano, delimitando uma região no interior da qual o relé deve operar.

A característica do modelo implementado, mostrada na Figura 2, apresenta três componentes: uma lente simétrica composta pela interseção de dois círculos de mesmo raio; a reta *blinder*, que corta a lente ao meio e divide o plano de impedância nas regiões esquerda e direita; e, por fim, a reta de reatância que é perpendicular ao *blinder*.

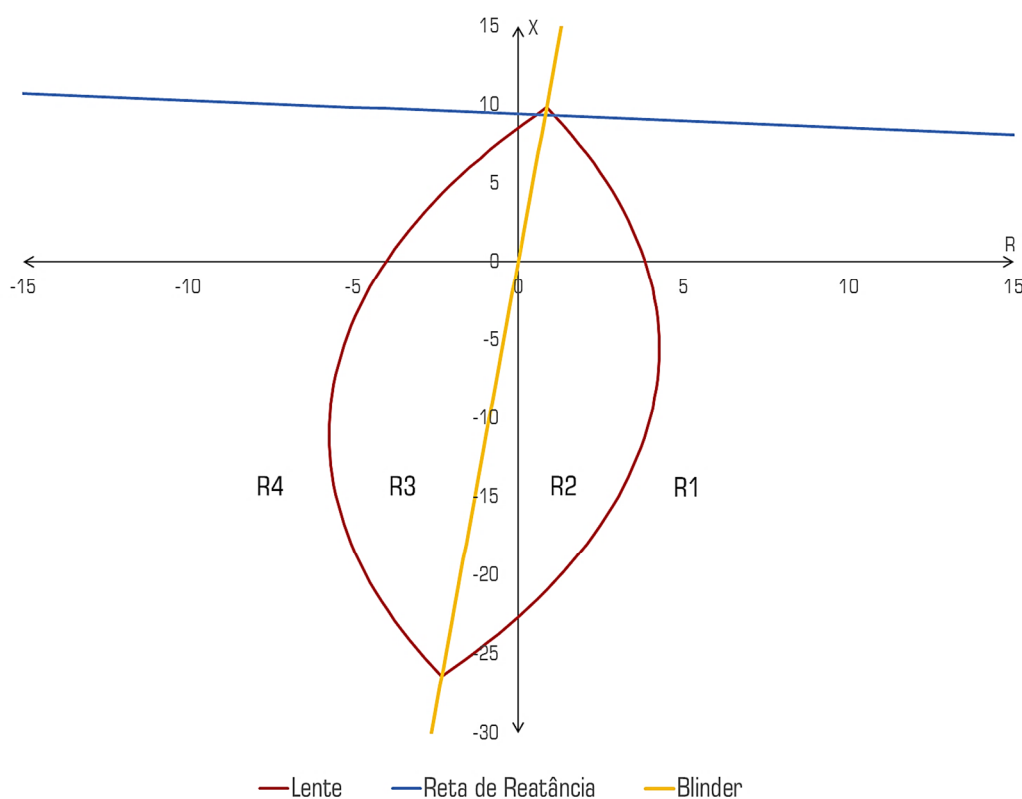


Figura 2 - Característica lenticular da proteção 78 [2].

A atuação do relé é, ainda, dividida em regiões de operação designadas por R1, R2, R3 e R4. Na operação de um gerador sob condições de carga normais, espera-se que a impedância esteja à direita da lente. O tempo mínimo de permanência nas regiões R2 e R3 pode ser ajustado com temporizadores T1 e T2, respectivamente. O relé registra um ciclo completo de escorregamento quando o ponto finalmente sai da lente na extremidade oposta, tendo ficado em cada região por tempo maior ou igual a cada temporizador.

## Implementação utilizando Embed

Calculando-se as coordenadas do ponto de operação é possível saber em qual das quatro regiões ele se localiza no plano R-X. A Figura 3 mostra o diagrama de blocos implementado no Embed que determina em qual região o ponto está (*isRx*) e em qual região o ponto estava no passo anterior (*isRxprev*).

Sabendo que a lente é formada pela interseção entre dois círculos e que a reta *blinder* passa pelos dois pontos em que esses círculos se interceptam, a região à qual o ponto pertence é definida pela posição do ponto em relação aos círculos e à reta, como indica a Figura 3. A fim de garantir a exclusividade do pertencimento de um ponto a determinada região, foram utilizados blocos do tipo *SET-RESET* (SR), cuja tabela-verdade pode ser vista na Tabela 1.

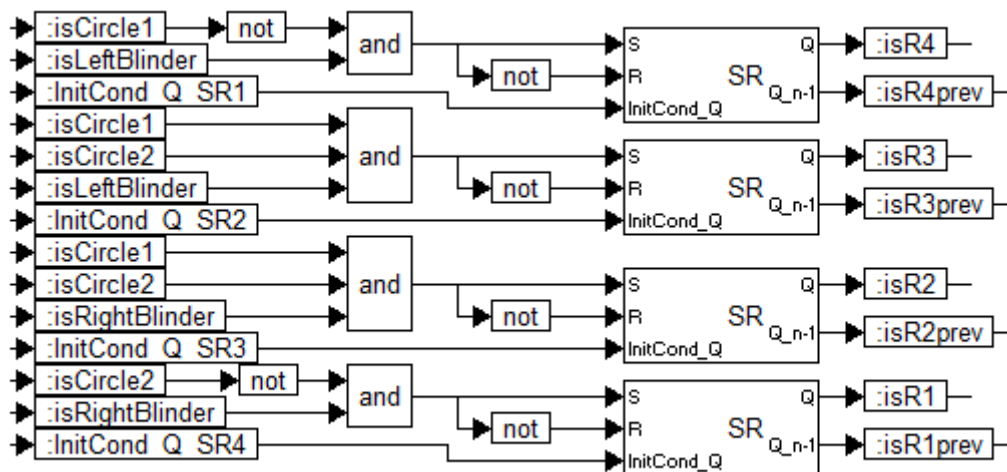


Figura 3 – Trecho do diagrama implementado no Embed para determinar a região do ponto de operação.

Tabela 1 – Tabela-verdade do flip-flop do tipo SR.

S	R	Q
0	0	Q <sub>n-1</sub>
0	1	0
1	0	1
1	1	0

O algoritmo de tomada de decisão para a proteção 78 conta também com uma máquina de estados, representada de forma simplificada na Figura 4, para seguir a trajetória do lugar da impedância. Existem quatro estados, IDLE, START, CONFIRM e DETECTED, e cada um tem um terminal de entrada e um ou mais terminais de saída, que são divididos em “saída normal” e “saída anormal”. Uma “saída normal” é aquela que leva ao estado seguinte no sentido

horário do ciclo. Movimentos inesperados do lugar da impedância implicam numa “saída anormal” e fazem a máquina de estados retornar para IDLE.

IDLE é o estado no qual o gerador se encontra quando opera sob condições normais de carga e o lugar da impedância está em R1. Todo ciclo de escorregamento deve começar por aqui. A saída normal desse estado acontece quando o lugar da impedância passa para R2.

Seguindo o raciocínio presente na Figura 4, ao passar para R2 o estado STATE é iniciado e o Timer1 começa a contar quanto tempo o lugar da impedância permanece em R2. Se acontece uma mudança para R1 ou R4 ou ainda para R3, mas antes do tempo T1, a máquina de estados volta para IDLE. Se o lugar da impedância permanece em R2 por um tempo maior que T1 e se move para R3, o estado CONFIRM é iniciado.

Ao entrar no estado CONFIRM o Timer1 é reiniciado e o Timer2 é ativado para contar o tempo que lugar da impedância permanece na região R3. Se acontece uma mudança para R1 ou R2 ou ainda para R4, mas antes do tempo T2, a máquina de estados volta para IDLE. Se o lugar da impedância permanece por um tempo maior que T2 e se move para R4, o estado DETECTED é iniciado.

O estado DETECTED indica um ciclo completo de escorregamento. Qualquer movimento inesperado do lugar da impedância nesse estado é ignorado e o estado é mantido até que a impedância volte para R1, finalizando o ciclo de escorregamento. Os contadores de ciclos de cada zona são atualizados e se o número de ciclos completos for igual ao número máximo de ciclos permitidos, o sinal de TRIP é emitido, indicando a perda de sincronismo do gerador.

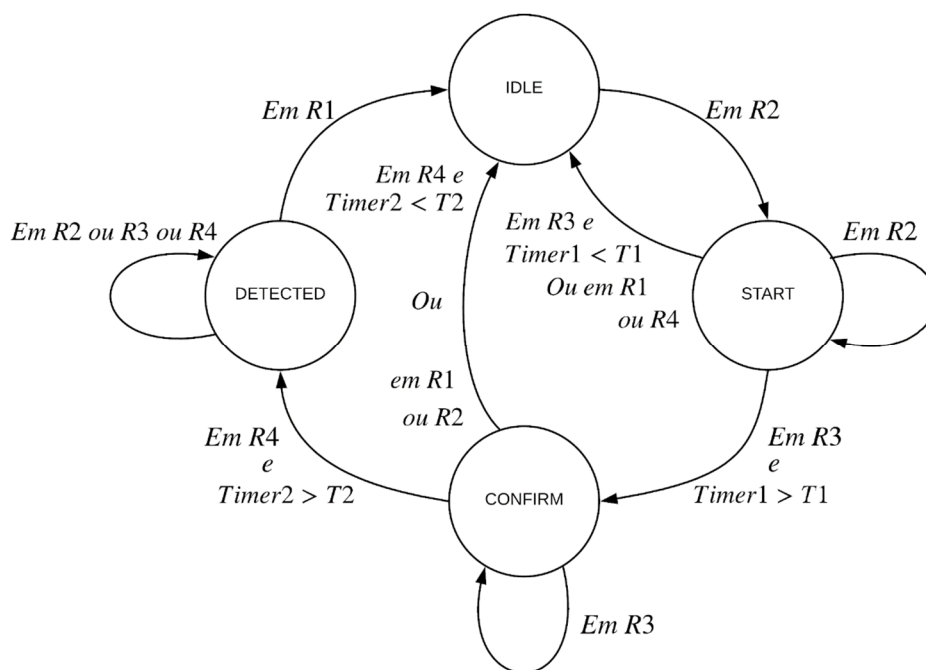


Figura 4 - Máquina de estados da proteção 78 [2].

A máquina de estados foi implementada utilizando o Embed como pode ser visto na Figura 5, na qual foram novamente utilizados os blocos SR para manutenção da memória relativa ao estado anterior da máquina. Esse diagrama contém a lógica para identificar se a máquina está em um determinado estado (isESTADO) e o estado do passo anterior (isESTADOprev) de acordo com a região do ponto de operação e o tempo medido pelos *timers*.

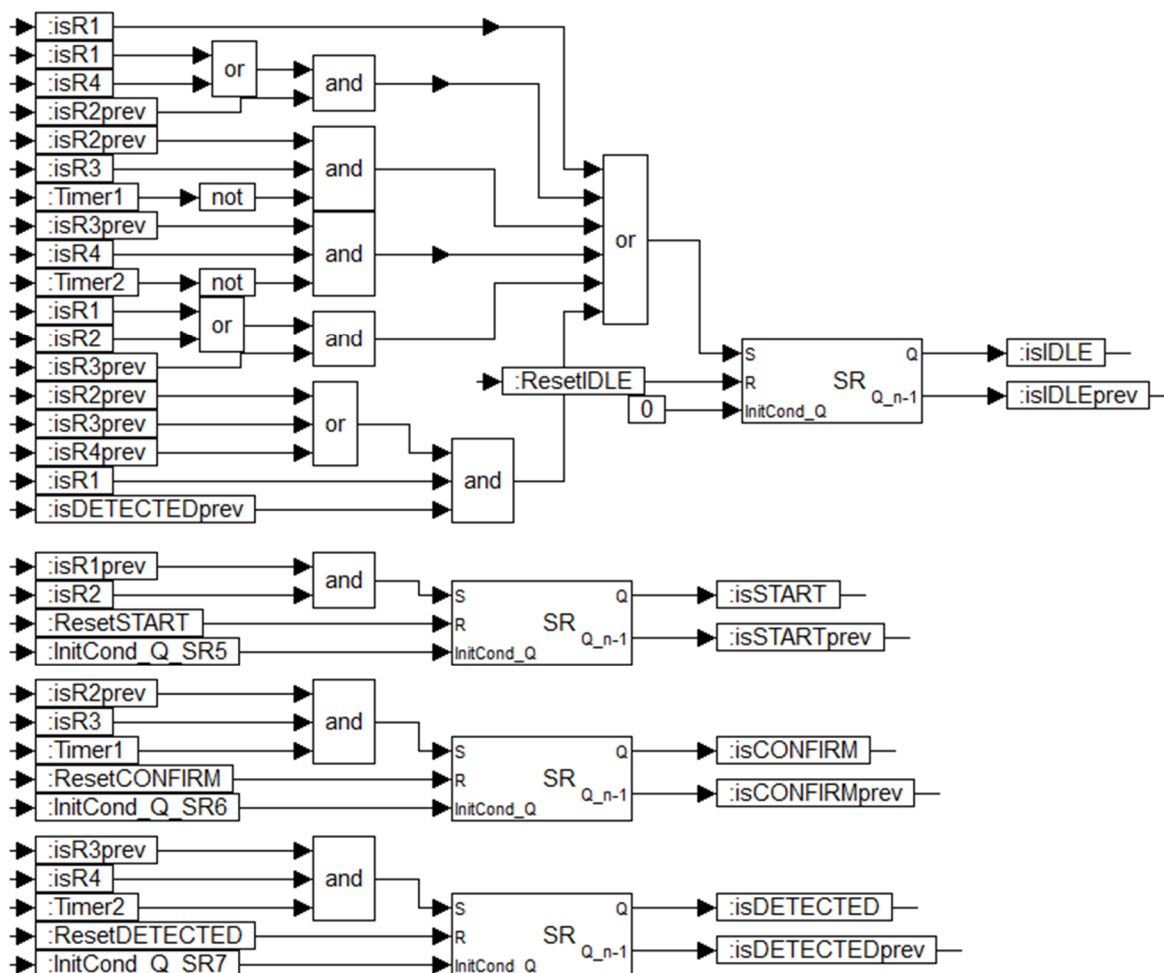


Figura 5 – Diagrama para identificação dos estados no Embed.

## Simulação

A fim de comprovar o funcionamento do relé, foi realizada uma simulação com um modelo de gerador síncrono previamente implementado também em Embed. A contingência consistiu na aplicação de um afundamento de tensão terminal em rampa de inclinação -4%/s ao longo de 20s.

A Figura 6 apresenta a trajetória da impedância vista pelo gerador durante o afundamento, superposta à característica da proteção. A trajetória começa no ponto t0 em R2 e oscila entre R3 e R2, até atingir finalmente a região R1 por volta de 45s de simulação, condição necessária para o início de um ciclo de escorregamento. A Figura 7 destaca o primeiro

instante em que a impedância passa por todas as regiões de proteção respeitando o tempo mínimo de cada *timer*; de forma que a máquina de estados passa por um ciclo completo, resultando na emissão do sinal de *trip*.

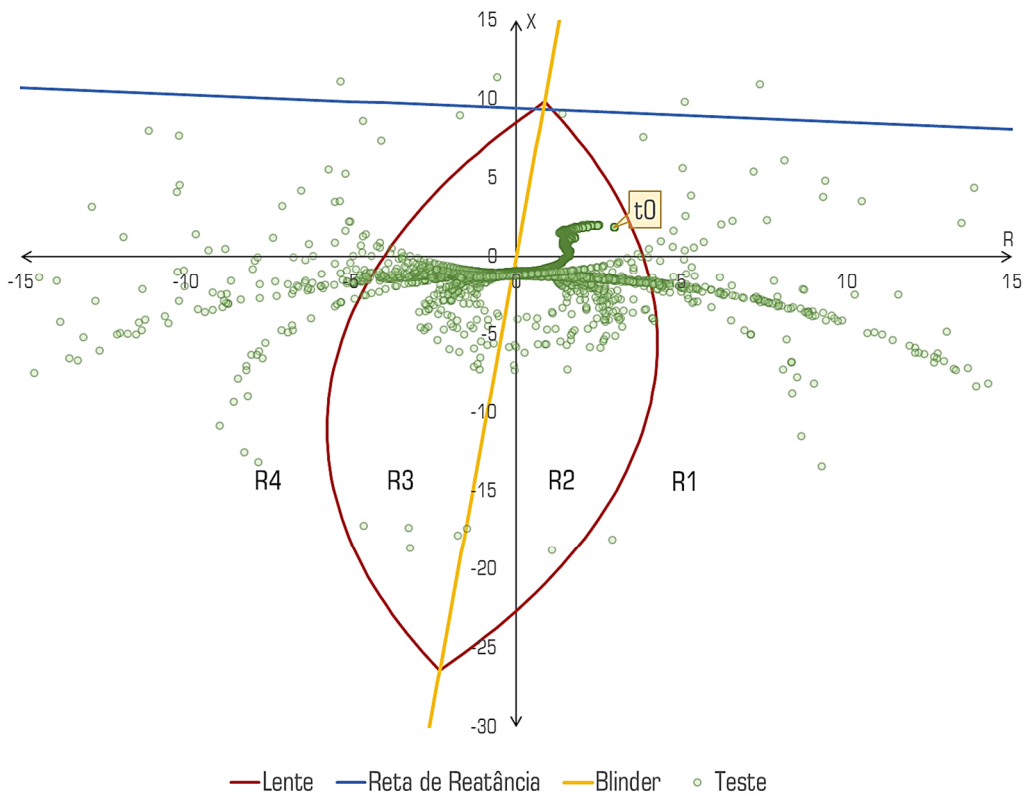


Figura 6 - Trajetórias do ponto de operação do gerador para os 3 testes.

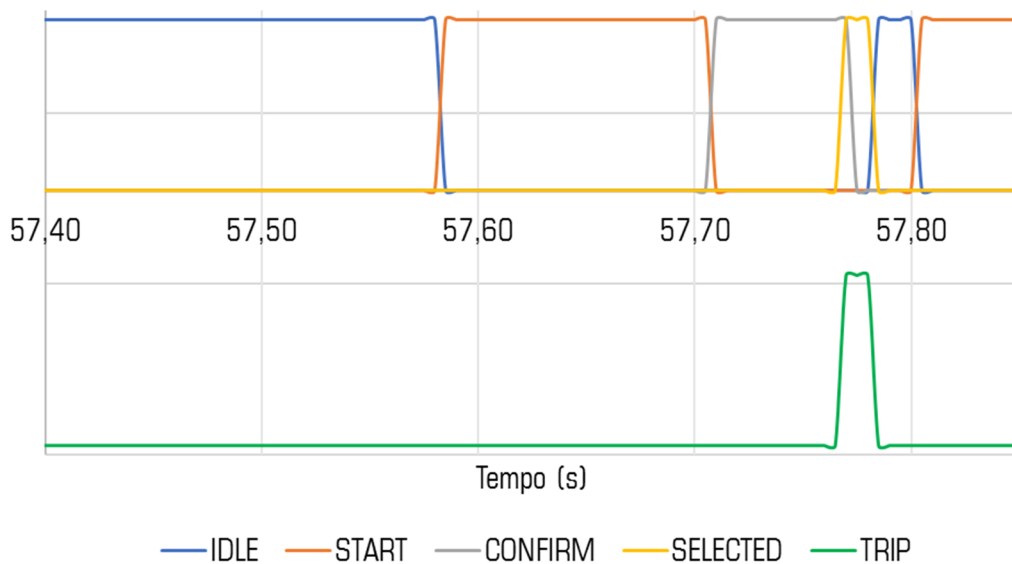


Figura 7 – Primeiro ciclo completo da máquina de estados, resultando no sinal de trip.

O teste realizado no Embed demonstrou que a detecção da passagem pelas diferentes regiões da lente foi corretamente identificada, assim como a transição de estados da máquina. O sinal de *trip* foi, conseqüentemente, emitido ao ocorrer um ciclo completo de escorregamento, validando a implementação do modelo.

O *software* mostrou-se, como esperado, um ambiente ideal para implementação e simulação, fornecendo todas as vantagens do uso de diagramas de blocos aliadas à flexibilidade conferida pela ferramenta de tradução para C. Dessa forma, a modelagem do relé pode ser adaptada para reutilização em diferentes ambientes. O Embed fornece, ainda, a possibilidade de simulação do tipo *hardware-in-the-loop* (HIL) para teste de equipamentos e prototipagem – caracterizando-o como uma ferramenta completa para projetos.

## Bibliografia

- [1] IEEE, IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE 242.2001™, 2001.
- [2] Areva, *MiCOM P342, P343, P344, P345 Generator Protection Relays Technical Manual*, 2005.