Computational modeling of protection functions for studies involving power oscillation and loss of synchronism in electrical systems

Jyulliano A. F. Rocha*. Thales T. Lopes.**
**ONS – Operador Nacional do Sistema, Rio de Janeiro, Brasil, (e-mail: jyulliano@gmail.com)*

***Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense - UFF, Niterói, Brasil, (e-mail: thalesterrola@id.uff.br)*

Abstract: Power systems are subject to different types of disturbances, such as faults, line switching or loss of a large generator. The system is designed to adjust to these changing conditions within voltage and frequency limits. However, some system disturbances may cause loss of synchronism between a generator and the rest of the grid, or between interconnected power systems. During events of loss of synchronism, it is necessary to separate the generator or system areas operating asynchronously to prevent cascading power outages and equipment damage. On the other hand, severe power swings may seem as a fault, leading to undesired trips for conditions which may be stable. In this scenario, it is necessary to block relays that are sensitive to operate. This paper aims to present a modeling for the out-of-step tripping relay (78 OST) and out-of-step blocking relay (68 OSB) using the Matlab\Simulink software. The models were availed for a range of events such as loss of generators, faults and line openings, in order to evaluate the effectiveness of these relays in avoiding major impacts on the system.

Resumo: Sistemas de potência estão sujeitos a diferentes tipos de distúrbios, como faltas, abertura de linhas ou perda de grandes unidades geradoras. O sistema é projetado para se ajustar a essas mudanças na condição de operação, mantendo os limites de tensão e frequência. Contudo, alguns distúrbios podem causar perda de sincronismo entre unidades geradoras e o resto da rede, ou entre sistemas de potência interconectados. Durante eventos de perda de sincronismo, é necessário desconectar o gerador ou áreas que estejam operando de forma assíncrona para evitar desligamentos em cascata ou danos aos equipamentos. Por outro lado, fortes oscilações de potência podem ser reconhecidas como faltas, levando ao disparo indesejado de disjuntores para condições que podem se tornar estáveis na operação. Neste cenário, é necessário bloquear relés que sejam sensíveis a operar. Este trabalho tem por objetivo apresentar a modelagem de sistemas de proteção para disparo por perda de sincronismo (78 OST) e bloqueio por oscilação de potência (68 OSB), usando o *software* Matlab\Simulink. Os modelos foram testados para diferentes eventos como perda de geradores, faltas e abertura de linhas, avaliando a efetividade dessas proteções em evitar maiores impactos ao sistema elétrico.

***Keywords*:** Power system protection; out-of-step relays; distance relay; power swing blocking; Matlab\Simulink.

***Palavras-chaves*:** Proteção de sistemas de potência; relé de perda de sincronismo; relé de distância; bloqueio por oscilação de potência; Matlab\Simulink.

1. INTRODUÇÃO

Durante condições normais de operação, onde há um equilíbrio entre geração e carga, os sistemas elétricos tendem a operar muito perto da frequência nominal. Nessa condição, a potência mecânica de entrada e potência elétrica de saída estão balanceadas. Quando ocorre uma perturbação no sistema, isso provoca a perda equilíbrio entre as potências de entrada e saída da máquina que respondem acelerando ou desacelerando, refletindo a transferência de energia em falta ou em excesso para o movimento dos rotores. Esse processo de aceleração ou desaceleração cria uma diferença angular entre os rotores de diferentes máquinas (Kundur, 1994).

Como todo sistema físico busca uma posição de equilíbrio energético, um fluxo de potência da máquina mais acelerada começa a fluir para a máquina com velocidade mais baixa, contudo, em um dado momento, esse processo sofre uma inversão, onde a máquina que antes estava acelerada cai abaixo da velocidade de equilíbrio e a máquina que antes estava com baixa velocidade passar a operar acelerada, invertendo também o fluxo que se mostra com um fluxo oscilante entre essas máquinas. Esse processo ocorre devido à grande inércia dos rotores das máquinas. Para pequenas perturbações, são os fluxos entre máquinas que as estabilizam

em um novo ponto de operação. Contudo, para perturbações mais severas, esses fluxos podem se mostrar mal amortecidos ou com amortecimento negativo, levando o sistema à perda de sincronismo ou até mesmo à condição de instabilidade.

As técnicas tradicionais de detecção de oscilações de potência usam as medições de impedância de sequência positiva vista pelo TC e do TP usados pelo relé. Durante o regime normal de operação, essa impedância representa a carga do sistema vista a partir desse ponto. Essa impedância é de valor bem superior à última zona de proteção do relé de distância (21). Quando ocorre uma falta no sistema, a tensão tende a zero acompanhando um forte aumento na corrente, fazendo com que a impedância vista pelo relé tenda a zero com uma taxa de variação muito rápida, da ordem de poucos milissegundos. Em uma oscilação de potência ou perda de sincronismo, a variação dos valores de tensão e corrente é lenta, fazendo com que sua taxa de variação e deslocamento no diagrama R-X seja da ordem de segundos (Neri, 2015).

Relés digitais de proteção dotados das funções contra oscilação de potência (68OSB – *Out-of-Step Blocking*) e perda de sincronismo (78OST – *Out-of-Step Tripping*) são usados para detectar, diferenciar e atuar durante eventos de oscilação de potência e perda de sincronismo em sistemas de potência. Dependendo do evento detectado, o relé decidirá entre bloquear a proteção de distância para um evento de oscilação de potência estável ou mandar um sinal de disparo aos disjuntores das linhas quando uma oscilação instável for detectada. Isso deve ser feito no menor tempo possível com o intuito de evitar altos níveis de corrente e quedas de tensão que aparecem quando duas áreas do sistema perdem sincronismo. A parametrização desses relés mostra-se complexa, principalmente quando considerada a coordenação de vários relés espalhados por diferentes áreas do sistema.

Neste trabalho, as funções de proteção 68OSB e 78OST foram modeladas no ambiente Matlab/Simulink. O método de detecção implementado foi o método das características, mais especificamente o de *blinders* duplos. Com isso, foram simulados vários eventos de perda de carga, perda de geração, perda de linhas de transmissão e faltas em linhas em dois sistemas testes com intuito de verificar a efetividade e impacto da atuação dessas proteções.

2. FENÔMENOS DE OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA E PERDA DE SINCRONISMO

As funções de proteção de linhas, sobrecorrente, diferencial e distância, podem não atuar para casos de perda de sincronismo, enquanto podem atuar indevidamente para casos de oscilações de potência estáveis. A melhor forma de se diferenciar um evento de perda de sincronismo de um evento de oscilação de potência é pelo comportamento e trajetória da impedância no diagrama R-X (Mooney & Fischer, 2006). Para um evento de perda de sincronismo, a impedância tende a cruzar o eixo de reatância e formar uma circunferência. No caso de uma oscilação de potência estável, a impedância tende a se aproximar do eixo de reatância X, mas sem cruzá-lo (Neri, 2015). Nesta situação, a oscilação pode vir a cruzar a 3ª ou 2ª zona de um relé 21, e em casos mais extremos, entrar em sua 1ª zona de atuação. Esse comportamento é ilustrado na Fig. 1.

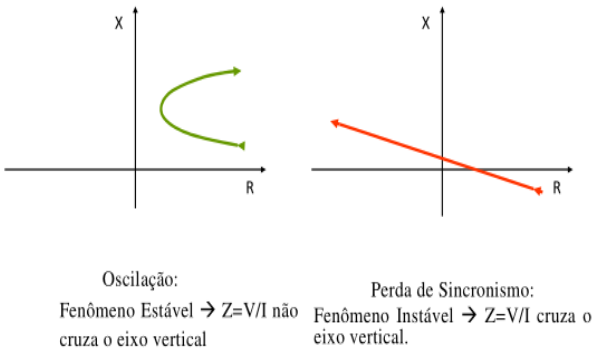

Fig. 1 - Trajetória da impedância para oscilação e perda de sincronismo.

3. MODELAGEM DAS FUNÇÕES ANSI 78 e ANSI 68

Este trabalho tem como proposta o uso do método das características ou separadores (*blinders duplos*) na lógica dos relés digitais para a diferenciação dos fenômenos de oscilações de potência, perda de sincronismo e faltas. O método avaliado é o mais comumente empregado pelos fabricantes de relés, mas outros métodos têm sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas, como o método Rdot, o método de cálculo da impedância contínua, o método da taxa de variação da amplitude da tensão no centro elétrico e o método dos sincrofasores (Menco, 2018).

3.1 Método das Características (Blinders)

Este método usa o conceito da variação da impedância no plano R-X e considera o tempo que leva para a impedância vista pelo relé atravessar as características (Tziouvaras, 2004). Nesse método são usadas duas ou quatro retas paralelas a depender do método de disparo. O primeiro temporizador é acionado quando do cruzamento entre a impedância e o separador mais externo e o segundo no cruzamento com o separador mais interno. A partir da diferença de tempo entre esses temporizadores, é feito uma comparação com um tempo pré-ajustado. Caso se verifique um tempo maior que o tempo ajustado, uma oscilação de potência é declarada. Uma das vantagens desse método é a sua possibilidade de utilização com qualquer tipo de relé de distância, seja do tipo impedância, admitância ou reatância. A Fig. 2 mostra o posicionamento das características em relação a zona de atuação de um relé de distância do tipo admitância, ilustrando a variação da impedância durante uma oscilação de potência, que corta as zonas de proteção do relé.

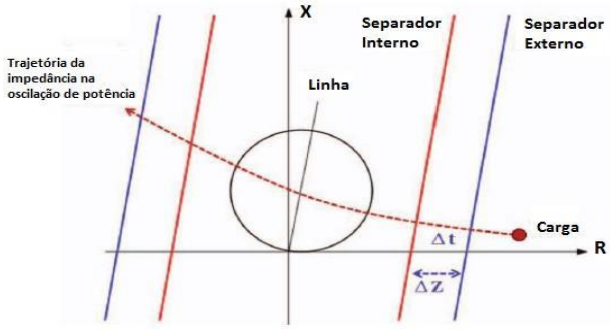

Fig. 2 - Método das características (Verzosa, 2013).

3.2 Funções de Disparo por Perda de Sincronismo- 78 OST e Bloqueio por Oscilação de Potência - 68 OSB

A função 78 (*Out-of-Step Tripping* - OST) opera a partir de uma condição de perda de sincronismo confirmada, enviando um sinal de disparo aos disjuntores de linhas pré-selecionadas, geralmente as linhas de intercâmbio entre diferentes áreas, para tentar manter sistemas ilhados estáveis. A função 68 (*Out-of-Step Blocking* - OSB) opera a partir de uma condição de oscilação de potência estável, enviando um sinal de bloqueio à proteção de distância (21) da linha protegida pelo relé. O objetivo é evitar uma atuação incorreta do relé de distância antes que a impedância entre nas suas zonas de atuação (Tziouvaras & Hou, 2004).

A parametrização da função 78 OST se dá pelo uso de um temporizador ajustado para o tempo da oscilação da potência mais próxima da instabilidade verificada em simulações. Esse ajuste evidencia a dificuldade de se garantir a atuação precisa da função, pois busca ao mesmo tempo atuar para oscilações instáveis e evitar a atuação incorreta para oscilações estáveis. Por isso, é comum a aplicação de margens de segurança nos ajustes da proteção.

O bloqueio da proteção de distância durante oscilações de potência estáveis, de forma a evitar uma abertura de linha desnecessária, acaba criando um novo problema, que é a possibilidade da ocorrência de faltas durante o período de bloqueio. Caso isso aconteça, é imprescindível que as mesmas sejam detectadas e eliminadas com a máxima rapidez e seletividade possíveis, só que isso só é possível caso a proteção de distância seja desbloqueada para permitir sua atuação (Tziouvaras, 2004). Com o objetivo de permitir a atuação correta da proteção quando a proteção de distância estiver bloqueada por uma oscilação de potência, é necessário o uso da função UBOSB (U*nblocking Out-of-Step Blocking*), sendo o método tradicionalmente mais empregado de desbloqueio por nível de corrente de sequência negativa (50Q). Este método apresenta a desvantagem de não ser capaz de desbloquear a proteção de distância quando da ocorrência de curtos-circuitos simétricos.

3.3 Modelagem do Relé de Distância

A Fig. 3 ilustra o diagrama de blocos do Matlab/Simulink desenvolvido para a modelagem do relé digital de distância do tipo admitância, operando em três zonas de atuação, sendo a primeira instantânea e a segunda e terceira temporizadas, com temporizações de 200ms e 300ms respectivamente. A aquisição dos sinais de tensão e corrente é realizada por blocos medidores e suas magnitudes reduzidas por blocos de ganho com valores iguais à Relação de Transformação de Potencial (RTP) e à Relação de Transformação de Corrente (RTC). A saída do bloco do relé de distância é o sinal de disparo do disjuntor. Esse sinal passa por um bloco Conversor (Convert), convertendo o sinal do tipo booleano para um sinal temporal. O sinal temporal é retardado por 6 ciclos (100ms) em um bloco de Atraso, sendo posteriormente convertido para numérico, para controle do estado do disjuntor. O atraso de tempo foi introduzido para modelar o tempo de operação completa dos disjuntores.

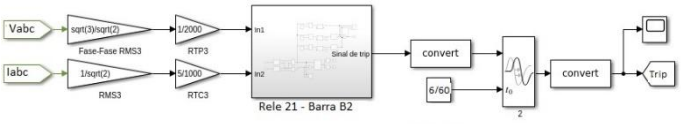

Fig. 3 – Diagrama de blocos do relé de distância do tipo admitância.

Para a lógica de operação do relé de distância, ilustrada no diagrama de blocos da Fig. 4, os sinais de entrada passam por um bloco Analisador de Sequência, para obtenção das componentes de sequência positiva, tanto do sinal de tensão quanto da corrente. As saídas desse bloco alimentam outro bloco para a extração das componentes reais e imaginárias destes fasores, que são empregados para o cálculo da impedância vista pelo relé de distância. O valor do módulo da impedância vista pelo relé é comparada com os valores pré-ajustados das três zonas de atuação da proteção através do bloco Operador Relacional (≤.), sendo a definição do alcance das 3 zonas feita conforme (Kinderman, 2005). O sinal de saída do bloco Operador Relacional (OR) alimenta três blocos Flip-Flop SR (relés biestáveis), que representam cada um deles uma zona de proteção. Caso a impedância entre em alguma zona de proteção, a saída do bloco OR e do Relé Biestável muda de 0 para 1, sinalizando a abertura do disjuntor. Por fim, as saídas dos três relés biestáveis, com e sem temporização, são combinadas em um operador lógico XNOR, de forma a alterar o estado do sinal de disparo do disjuntor pela mudança em qualquer saída de relé biestável das três zonas.

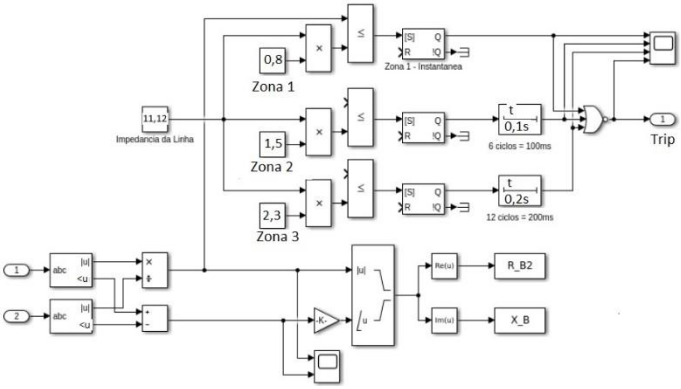

Fig. 4 – Lógica de blocos para atuação do relé de distância.

3.4 Modelagem do Método das Características

A modelagem dos relés de bloqueio por oscilação de potência e perda de sincronismo teve por base o método das características descrito em (Tziouvaras, 2004). A partir da impedância de sequência positiva medida pelo relé, determina-se o tempo de cruzamento de uma característica (*blinder*) pela impedância posicionada no diagrama R-X, diferenciando um evento de oscilação de potência de uma perda de sincronismo ou uma falta.

O primeiro passo da lógica ilustrada na Fig. 5 é a obtenção da impedância complexa. Como o método utilizado neste trabalho é o das características duplas resistivas, apenas a parte real da impedância é relevante para a lógica da função. A parte real da impedância é comparada com os valores ajustados para as características através de dois blocos Operadores Relacionais (≤.), representando as características interna e externa do método. Caso o valor da impedância seja

inferior ao valor atribuído à alguma característica, a saída do bloco muda do estado 0 para o estado 1. Na saída de cada bloco Operador Relacional existe um bloco Detector de Transição, que irá emitir um pulso na sua saída na presença do estado 1, acionando o bloco Interruptor para a gravação do tempo registrado pelo bloco Relógio, representando o tempo de duração da oscilação dentro da região delimitada pelas retas das características representadas. Assim, o tempo exato do cruzamento da impedância com a característica externa é gravado no bloco T1, enquanto no bloco T2 é armazenado o tempo de cruzamento com a característica interna.

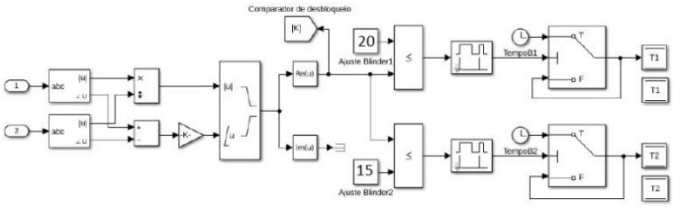

Fig. 5 – Lógica implementada para o método das características.

3.5 Modelagem da Função de Bloqueio para Oscilação de Potência (68 OSB)

A partir do método das características é possível verificar constantemente as diferenças dos tempos de cruzamento da impedância com as características ajustadas. A Fig. 6 ilustra o diagrama de blocos implementado para a função de Bloqueio para Oscilação de Potência. A partir dos tempos de cruzamento armazenados em T1 e T2, a diferença de tempo é constantemente calculada e comparada com um valor ajustado que caracteriza o tempo de uma oscilação de potência estável no sistema. Caso o valor da diferença de tempo seja superior ao valor ajustado, o estado do bloco Operador Relacional (≥) se altera de 0 para 1, acionando o bloco Detector de Transição, que emite um pulso e sensibiliza um relé biestável (Flip Flop SR), bloqueando a atuação do relé 21 e impedindo o envio do sinal de disparo para o disjuntor.

Para essa função também foi implementado o desbloqueio automático da proteção de distância quando a impedância retorna aos valores normais de operação, à direita da característica mais externa. A lógica implementada segue a lógica do bloqueio, contudo foi adicionado um bloco de temporização com retardo de 50 ms para o desbloqueio.

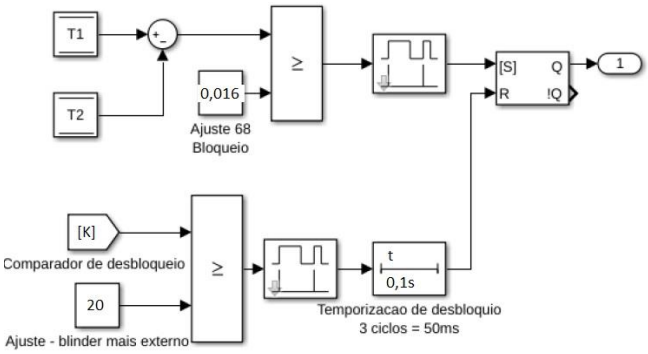

Fig. 6 – Esquema lógico para a função de bloqueio por oscilação de potência.

3.6 Modelagem da Função Perda de Sincronismo (78 OST)

A partir da diferença de tempo calculada pelo método das características e sua comparação com os valores ajustados para as características, realiza-se a detecção da perda de sincronismo no sistema elétrico, sendo ajustado para a perda de sincronismo um tempo inferior ao tempo de detecção da oscilação de potência estável e maior que o tempo de cruzamento na ocorrência de uma falta. Estes valores de temporização são obtidos através de estudos de simulação eletromecânica do sistema a ser protegido. A Fig. 7 ilustra o diagrama de blocos para a ativação da função de perda de sincronismo. Assim como no esquema da função de bloqueio, a saída de ambos os Operadores Relacionais se conectam a porta lógica AND, que aciona um bloco Detector de Transição que emite um pulso e sensibiliza um relé biestável (Flip Flop SR), responsável pelo acionamento do disparo do disjuntor.

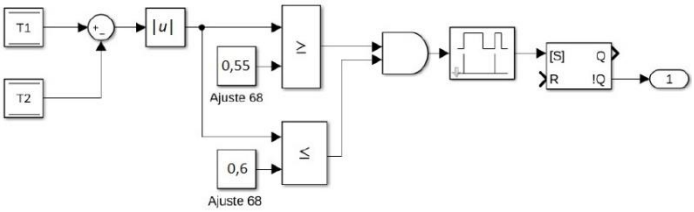

Fig. 7 – Esquema lógico para a função de perda de sincronismo.

3.7 Modelagem do Sistema Teste S1

Esse sistema é composto basicamente por dois geradores síncronos de 900 MVA (M1 e M2) conectados por duas linhas de transmissão (L1 e L2) de 400 km cada e uma carga (C) de 1080 MW. A tensão de geração em M1 e M2 é de 13,8 kV, sendo elevada por transformadores para 230 kV. A carga do tipo impedância constante está conectada ao barramento do gerador M2, sendo a única carga a ser suprida pelos dois geradores. A Fig. 8 ilustra o diagrama de blocos no Matlab/Simulink deste sistema.

3.8 Modelagem do Sistema Teste S2

Na Fig. 9 é apresentado o sistema S2, composto basicamente por três geradores síncronos (M1, M2 e M3) de 900 MVA cada, conectados por duas linhas de transmissão (L1 e L2) de 800 km, e duas cargas (C1 e C2) de 600 MW cada. A tensão de geração nas três unidades é de 13,8 kV, sendo elevada por três transformadores para o nível de tensão em 230 kV. A linha de transmissão inferior na Figura 9 é seccionada na metade por uma barra de passagem. A linha superior é seccionada por uma barra de passagem e por uma barra de geração, na qual está conectada o gerador M2. Cada linha tem um disjuntor em sua extremidade, controlados por sinais externos oriundos das funções de proteção de distância e perda de sincronismo. Nesse sistema também foi representado um banco de capacitores shunt de 400 MVAr conectado à barra de passagem da linha superior.

4. RESULTADOS

Os casos de atuação da proteção de distância e bloqueio por oscilação de potência foram avaliados no sistema S1, enquanto a proteção por perda de sincronismo foi avaliada no sistema S2. Em ambos os casos teste, retardos nas medições

causados pelos transdutores dos relés e perturbações nas medições de tensão e corrente, não foram modelados, pois o objetivo é avaliar a lógica e operação das funções 21, 68 e 78.

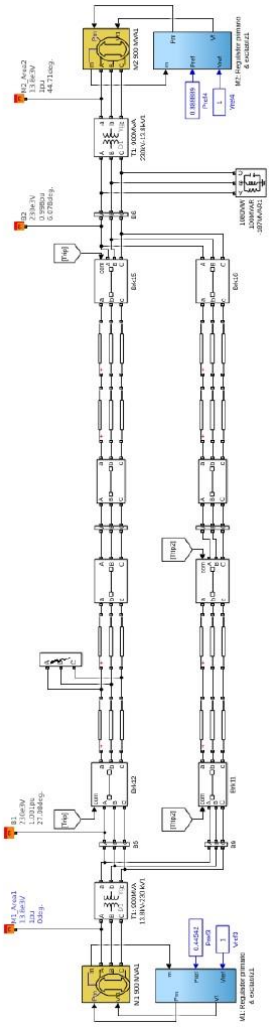

Fig. 8 - Sistema S1 - Modelagem no Matlab\Simulink.

4.1 Atuação da Função Bloqueio por Oscilação de Potência

Neste cenário será avaliada a atuação da função de bloqueio por oscilação de potência atuando sobre a proteção de distância das linhas, para o cenário de falta trifásica-terra a 25% da linha L1 no sistema S1. Observa-se na Fig. 10, que na ocorrência da falta no instante t = 0,5 segundos, a proteção de distância da linha L1 atua corretamente, promovendo a abertura dos disjuntores da linha. Contudo, a proteção de distância da linha L2 teve a sua atuação bloqueada, mantendo o fornecimento à carga. A proteção de distância da linha L1 opera em 1ª zona, sendo o disjuntor aberto transcorridos 100 ms, devido ao tempo estipulado nas simulações para a abertura do disjuntor.

As Figs 11 e 12 ilustram a potência ativa transmitida nas linhas L1 e L2 em função da atuação da proteção de distância na linha L1. Transcorrido o tempo de atuação do disjuntor, a potência transmitida em L1 passa a ser nula, enquanto a linha L2 fornece uma potência de 300 MW para o suprimento da carga C, em conjunto ao gerador M2.

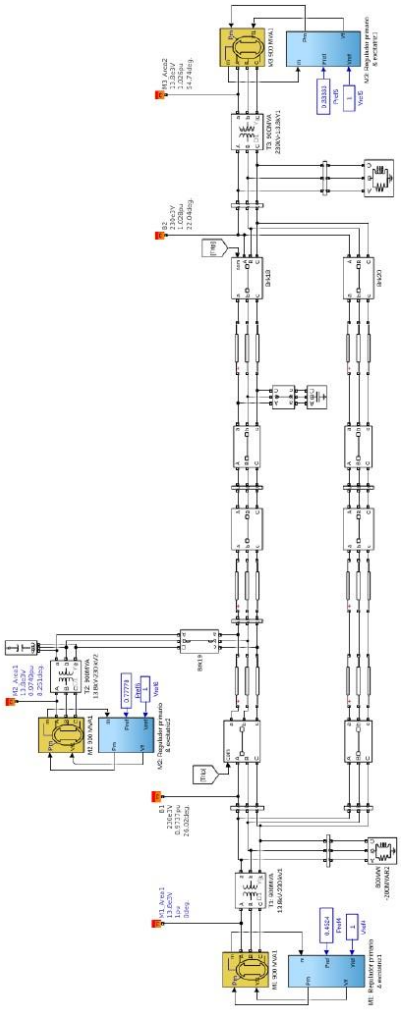

Fig. 9 - Sistema S2 - Modelagem no Matlab\Simulink.

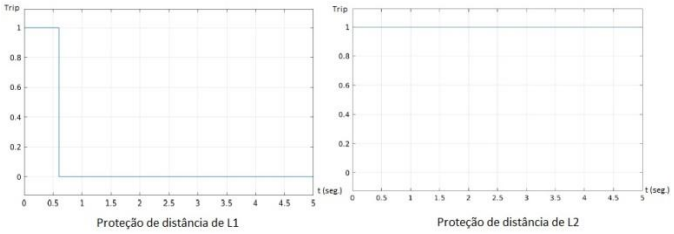

Fig. 10 - Sistema S1 - Modelagem no Matlab\Simulink.

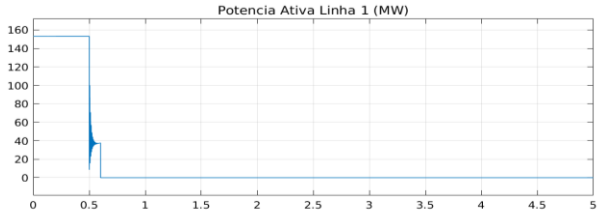

Fig. 11 – Potência ativa transmitida na linha L1.

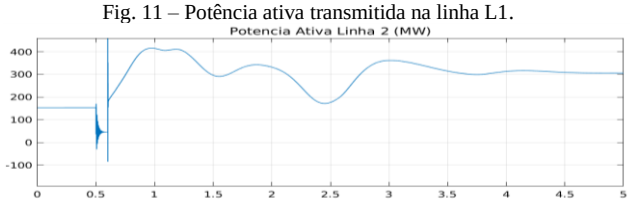

Fig. 12 – Potência ativa transmitida na linha L2.

4.2 Atuação da Função por Perda de Sincronismo

Nesta seção será avaliada a função de perda de sincronismo atuando no disparo dos disjuntores das linhas do sistema S2. A perda de sincronismo é provocada pela saída da linha L1 e consequentemente do gerador M2 em um instante de tempo em que este gerador operava com 700 MW. O sistema perde o sincronismo caso a proteção não atue, levando a grandes oscilações de tensão e corrente, com valores impraticáveis de fornecimento. A Fig. 13 traz o diagrama R-X no instante de simulação t = 1,8 seg., mostrando a oscilação de potência entrando nas zonas de proteção do relé 21.

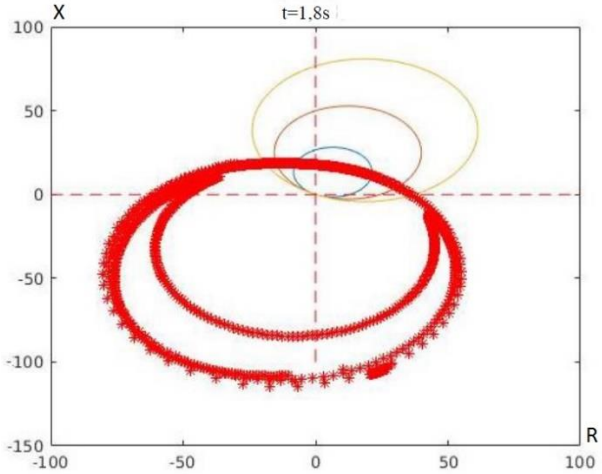

Fig. 13 – Diagrama R-X no instante t=1,8seg..

Com a inclusão da função de perda de sincronismo nas proteções das linhas L1 e L2, a mesma é levada a atuar, provocando o disparo dos disjuntores da linha L2 e permitindo assim a formação de dois subsistemas ilhados que se mantém individualmente estáveis. A Fig. 14 ilustra a tensão nos barramentos 1 e 2 e a potência ativa transmitida em L2, devido a atuação da função de perda de sincronismo, com a abertura dos disjuntores associados em 5,7 segundos. Observa-se que o sistema começa a experimentar oscilações crescentes de potência, tendendo a perda de sincronismo, o que leva a função 78 a atuar antes que o evento se concretize.

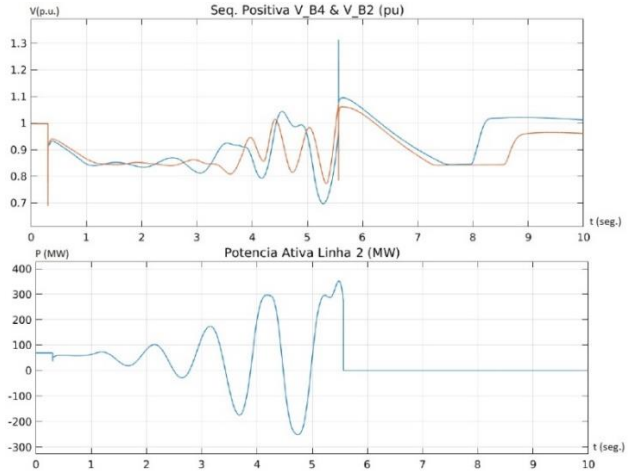

Fig. 14 – Tensões nos barramentos 1 e 2 e potência ativa na linha L2.

A trajetória da impedância no diagrama R-X é dada na Fig. 15. A impedância cruza as características uma primeira vez, porém a função não atuou devido ao fato de que o tempo do cruzamento foi superior ao ajustado. No caso do segundo cruzamento da impedância pelas características, a função pôde confirmar a iminente perda de sincronismo, provocando o disparo do disjuntor da linha L2.

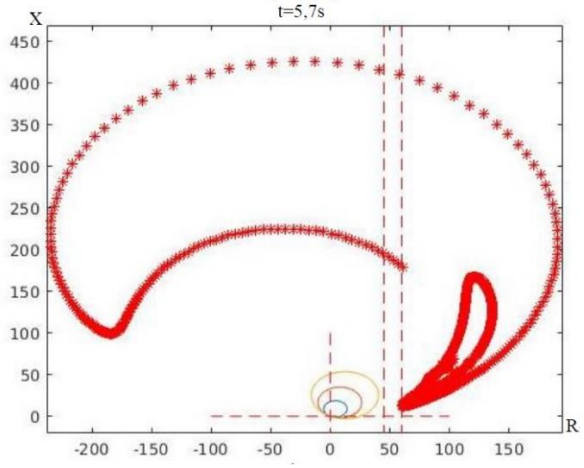

Fig. 15 – Diagrama R-X no instante t = 5,7seg.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou modelagens computacionais para a proteção de distância do tipo admitância e as funções de proteção por perda de sincronismo e bloqueio por oscilação de potência. Dada à complexidade do sistema no qual são empregadas, não é possível obter um ajuste de forma puramente analítica, fazendo necessário um estudo através de simulações computacionais para auxiliar os engenheiros nos ajustes. As simulações realizadas comprovaram a importância do uso dessas proteções no aumento das margens de segurança durante a operação do sistema elétrico de potência.

REFERÊNCIAS

Blackburn, J.L., Domin, T.J. (2014). Protective Relaying: Principles and Applications, 4° Edition, ed. CRC Press.

Kezunovic, M., Ren, J., Lotfifard, S. (2015). Design, Modeling and Evaluation of Protective Relays for Power Systems, 1° Edition, ed. Springer.

Kindermann, G. (2005). Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, vol. 2, 2ª Edição, UFSC , Florianópolis - SC.

Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control, 1° Ed. McGraw-Hill Professional Publishing, New York.

Menco, C.A.L. (2018). Método para detecção de oscilação de potência no domínio do tempo, Doutorado, UFSM.

Mooney, J., Fischer, N. (2006). Application Guidelines for Power Swing Detection on Transmission Systems, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 1-10, pp.2-4.

Neri, T.F. (2015). Proteção de Perda de Sincronismo – Aplicação e Avaliação no Sistema Interligado Nacional, Mestrado, UFRJ/COPPE.

Tziouvaras, D.A., Hou, D. (2004). Out-of-step protection fundamentals and advancements, 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers. https://doi.org/10.1109/CPRE.2004.238495

Verzosa, Q. (2013). Realistic testing of power swing blocking and out-of-step tripping functions, 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 420–449. https://doi.org/10.1109/CPRE.2013.6822056