

5 - DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento do algoritmo COGERA com seus respectivos detalhes e particularidades. A Figura 5.1 mostra o diagrama de blocos geral do algoritmo proposto, sendo seu detalhamento discutido ao longo do mesmo.

Pode-se notar que esse algoritmo é dividido em três partes principais que são : a partida, a classificação e os algoritmos específicos para tratamento de cada evento ocorrido no sistema.

Em seguida, uma vez efetuada a partida e classificada a ocorrência, toma-se, nesses algoritmos, a decisão da abertura ou não do disjuntor da interligação. Para os casos de curto - circuito, define-se por meio de um algoritmo de direcionalidade se o defeito é na concessionária ou na indústria (Algoritmo de Prakash [12]).

Para faltas na indústria, o tempo mostrado T_f serve na verdade como uma proteção *back-up* ou *breaker - failure* das proteções do transformador da indústria, dos alimentadores ou do próprio gerador, onde esse tempo deverá ser devidamente coordenado com essas proteções.

Para o algoritmo de ilhamento, a própria detecção ou não da corrente de quinta harmônica já serve para a respectiva tomada de decisão. Na condição de oscilação eletromecânica, calcula-se a passagem ou não pelo ponto limite de perda de estabilidade, usando o algoritmo de Minakawa mostrado em [35]. Nos ítems a seguir, discute-se os principais algoritmos mostrados no diagrama de blocos geral da Figura 5.1.

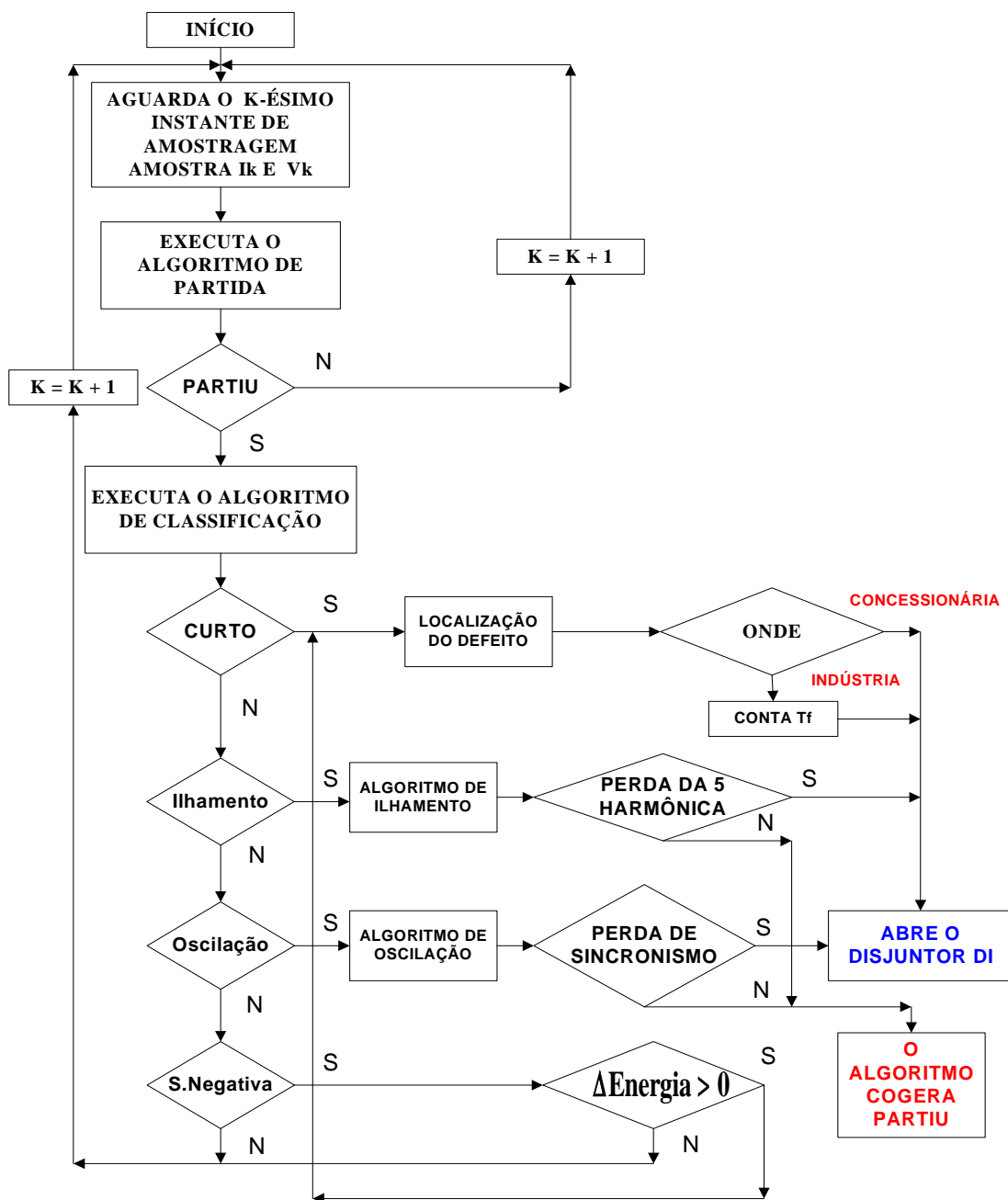


Figura 5.1 - Diagrama de Blocos do Algoritmo COGERA

5.1 - Algoritmo de Partida

O algoritmo de partida tem por finalidade detectar a ocorrência de um evento na interligação da concessionária - indústria. Essa detecção baseia-se em monitorar a variação de energia entre duas janelas consecutivas com os sinais de corrente medidos na interligação. Sendo M o número de amostras contidas na janela, a correspondente energia pode ser calculada pela expressão abaixo sobre o sinal discreto $x(n)$:

$$E_N = \sum_{n=0}^{M-1} |x(n)|^2 \quad (26)$$

As Figuras 5.1.1 a 5.1.6 ilustram a variação na energia, calculada segundo (26) e utilizando uma janela de 3 ciclos, para alguns exemplos de oscilação,ilhamento e curto - circuito, respectivamente. Nessa implementação, optou-se por utilizar , para o cálculo da energia, duas janelas com sobreposição entre ambas de 50 %.

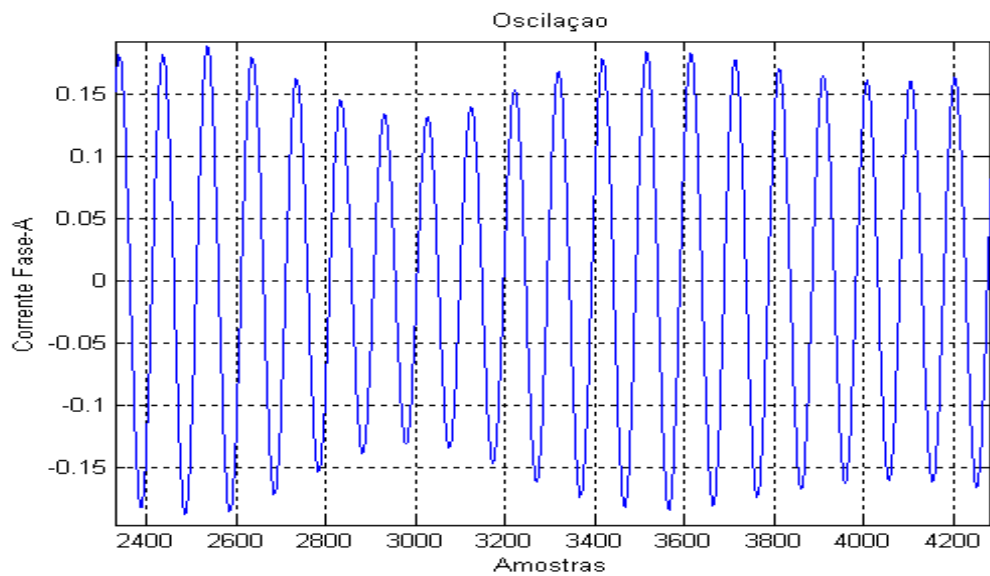


Figura 5.1.1 - Oscilação

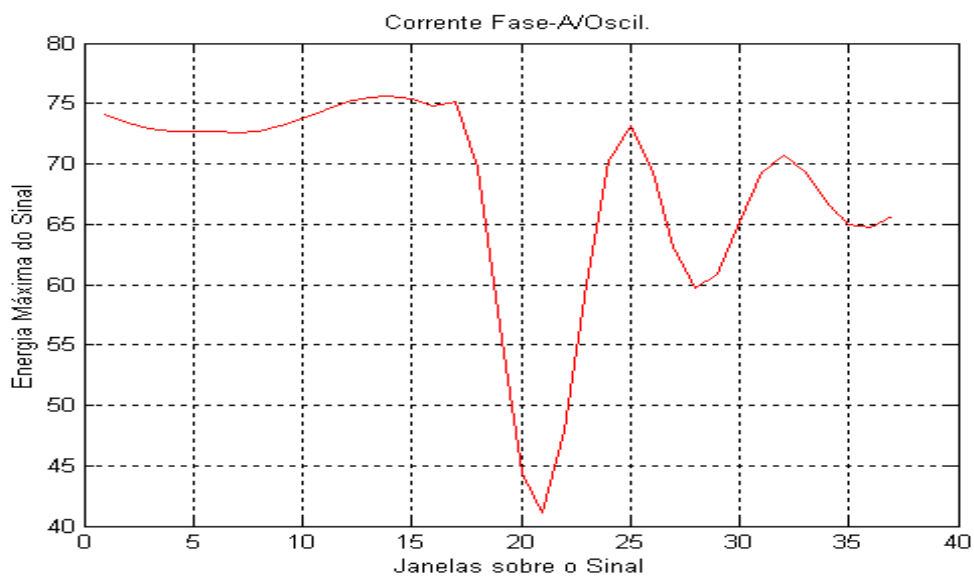


Figura 5.1.2 - Energia / Oscilação.

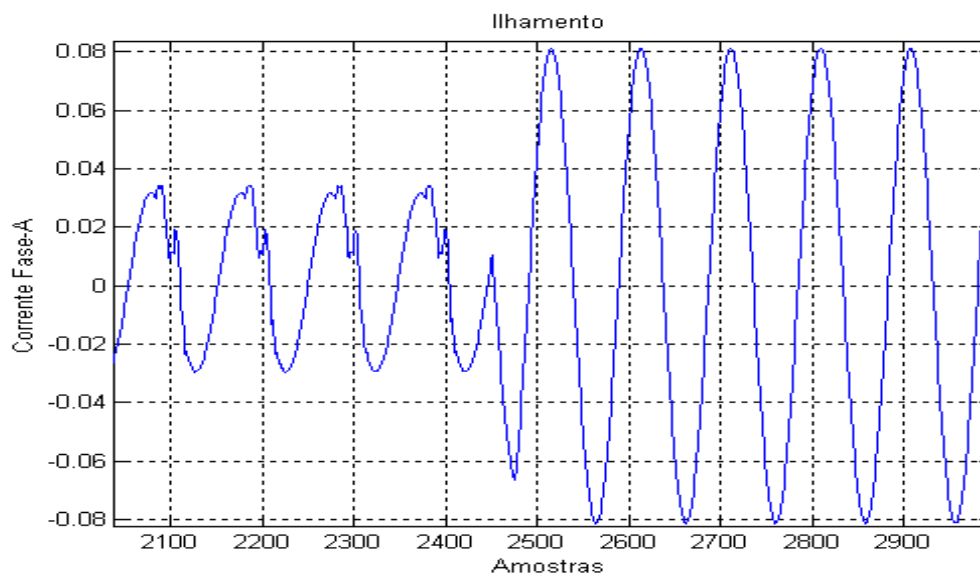


Figura 5.1.3 - Ilhamento.

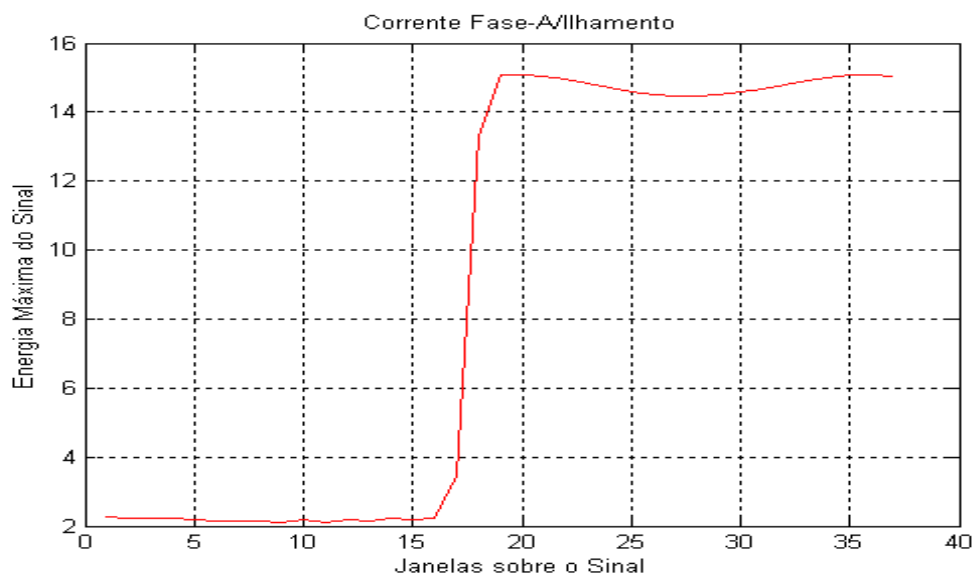


Figura 5.1.4 - Energia / Ilhamento

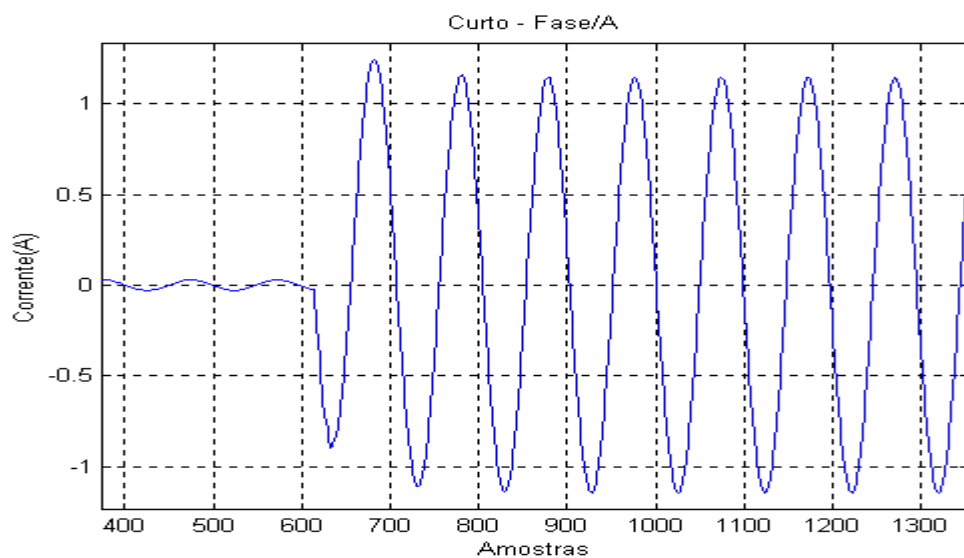


Figura 5.1.5 - Curto-Circuito.

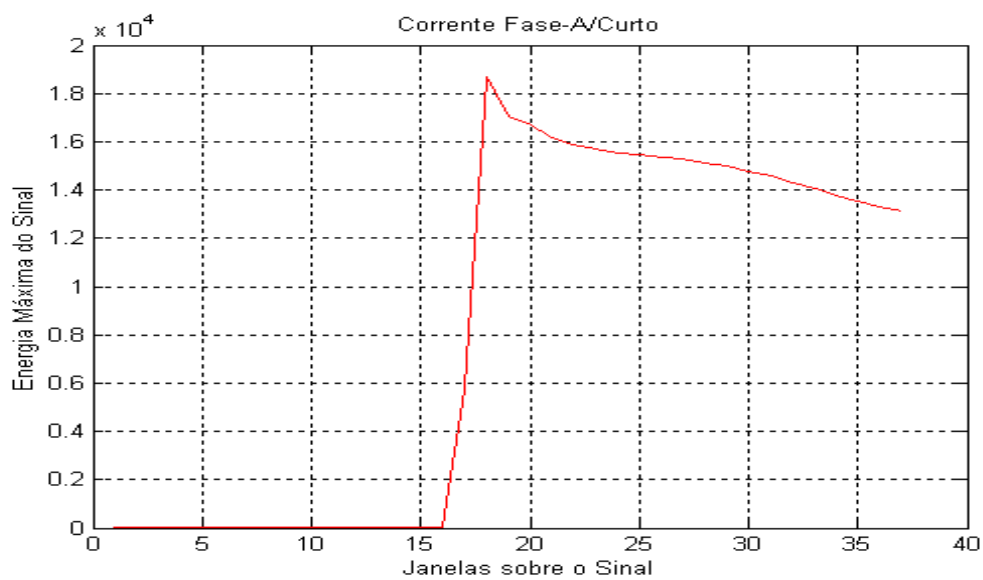


Figura 5.1.6 - Energia / Curto

Dado que a frequência de amostragem utilizada é de 16 amostras/ ciclo, cada janela irá conter 48 amostras e a variação de energia nessas duas janelas pode ser calculada por meio das equações a seguir sobre o sinal discreto $x(n)$.

Esse procedimento é inicializado pela última amostra k na entrada (que na realidade é a amostra Nd da Figura 5.1.8 mostrada a seguir).

$$E_{Janela1} = \sum_{j=0}^{47} |x_{k-j}|^2 \quad (27)$$

$$E_{Janela2} = \sum_{j=24}^{71} |x_{k-j}|^2 \quad (28)$$

$$\Delta E = \frac{E_{Janela1} - E_{Janela2}}{E_{Janela2}} \quad (29)$$

Se essa variação de energia for igual ou maior do que 10 % (positiva ou negativa), considera-se o algoritmo partido, mesmo que o evento não seja nenhum dos três eventos que fazem parte do processo de classificação do algoritmo. Vale ressaltar aqui que esse valor aparentemente baixo visa principalmente obter uma maior sensibilidade para os casos de oscilação, que apresentam características específicas conforme já mostrado ao longo do trabalho.

Devido ao fato de a proposição principal consistir em uma proteção com visão sistêmica que de fato não é responsável pela proteção primária de nenhum componente da rede, o algoritmo de partida proposto não é executado a cada amostra, mas sim a cada ciclo e meio, isto é, de 24 em 24 amostras. O diagrama de blocos da Figura 5.1.7 ilustra a proposta em pauta.

Nota-se, pelos resultados obtidos das simulações, que o método proposto de variação de energia entre duas janelas consecutivas, além de apresentar uma implementação simples, mostra-se sensível as pequenas variações contidas nesses sinais. Pode-se, portanto, captar algumas informações importantes sobre a análise efetuada e fazer comentários relativos aos sinais de corrente e tensão obtidos por meio dos transformadores de corrente e tensão na interligação para posterior aplicação nos eventos de classificação :

- Os sinais de tensão não apresentam variação em módulo e frequência para os casos de ilhamento com baixo intercâmbio de potência ativa entre os dois sistemas, pois a geração da indústria têm de ser capaz nestas condições de sustentar essa condição operativa.

- Como as linhas de interligação entre os dois sistemas são geralmente curtas, sua variação só se apresenta em módulo e não em seu aspecto freqüencial para os casos de defeito na concessionária.

Já para os sinais de corrente, esses mantêm as mesmas características de variação em módulo e freqüência para oscilação, mantêm uma variação considerável em módulo para os casos de curto e uma variação substancial de módulo/freqüência para os casos de ilhamento.

Portanto, referente à classificação, a decisão caberá às formas de onda de corrente típicas dos três eventos em questão, mostrados nas Figuras 5.1.1, 5.1.3 e 5.1.5.

Cabe ressaltar aqui que o algoritmo COGERA deverá fazer, por meio do processo de partida descrito nesse ítem, uma separação clara entre os eventos de pré e pós ocorrência dos mesmos, devido ao fato de que a janela de transição entre os fenômenos apresenta uma variação significativa de energia, o que implica em um espalhamento da mesma pelos diversos níveis de análise da ferramenta usada no processo de classificação (Transformada Wavelets) com a utilização da relação entre esses níveis para sua definição ((21) a (25)).

Pode-se tomar como exemplo ilustrativo a forma de onda de corrente de ilhamento mostrada na Figura 5.1.8 a seguir, onde se mostra as duas janelas consecutivas andando sobre o sinal com sobreposição de 50 %. Uma vez o algoritmo partido conforme descrito acima, pode-se ter acesso as amostras N_a e N_d a partir do qual tomam-se as as janelas de 4 e 20 ciclos antes e após a ocorrência dos eventos usadas no processo de classificação mostrado no capítulo 4.

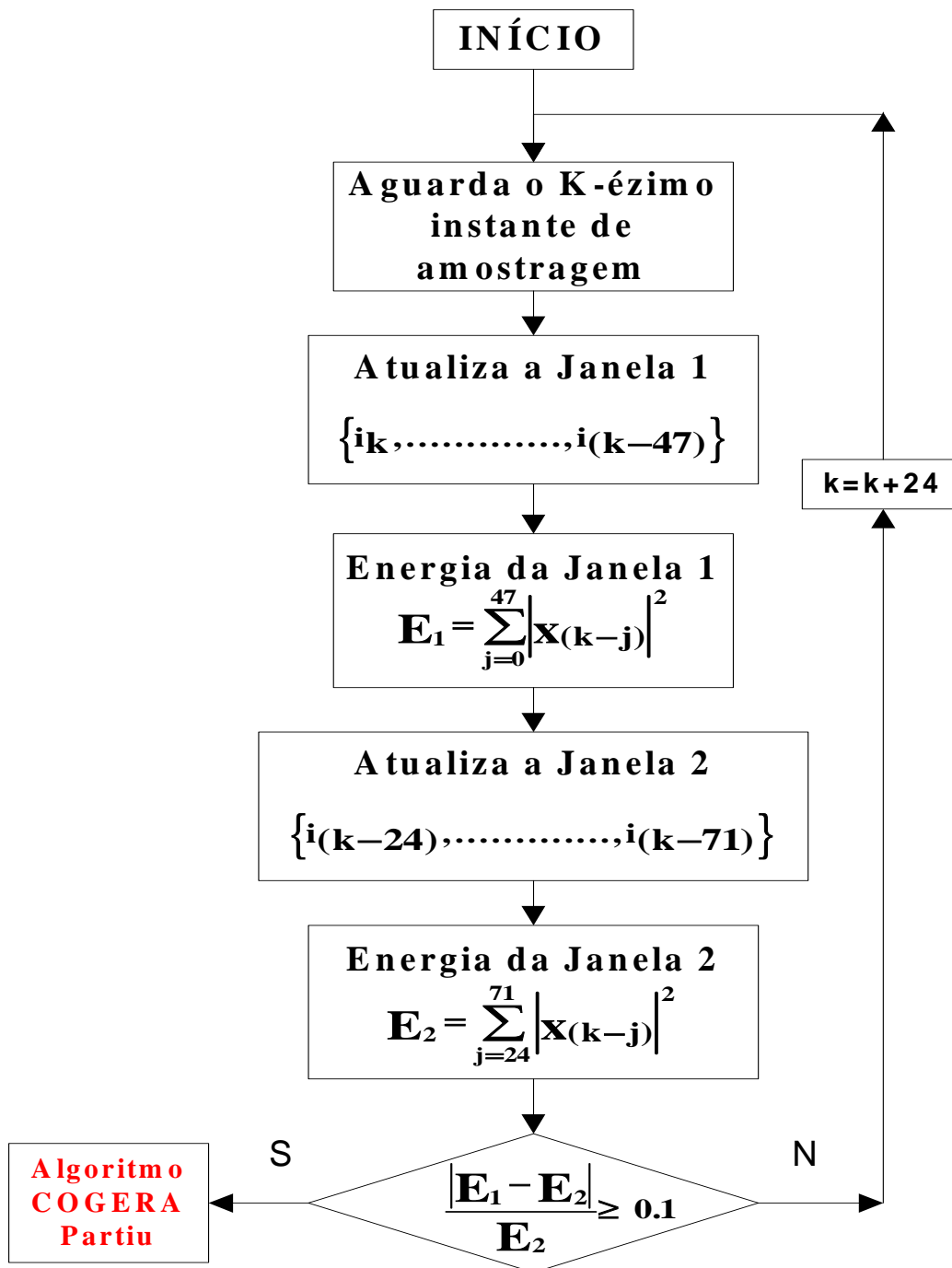


Figura 5.1.7 - Diagrama de Blocos - Algoritmo de partida

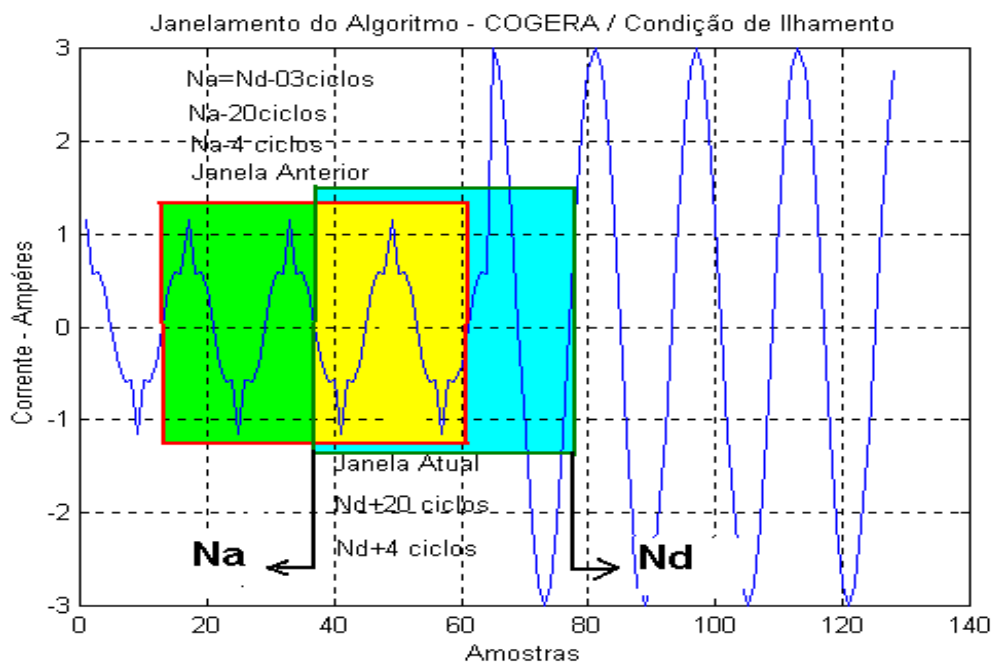


Figura 5.1.8 - Energia , Partida e Medição do Algoritmo COGERA

Na Figura 5.1.8 acima, é mostrado o princípio básico da proposta de medição e partida do algoritmo COGERA, com a janela de 3 ciclos andando sobre o sinal e uma sobreposição de 50 % entre duas janelas consecutivas. A mesma indica também que uma vez partido o algoritmo, se captura com as amostras contidas na memória da proteção as amostras N_a e N_d e as quantidades $N_a - 20$, $N_a - 3$, $N_d + 20$ e $N_d + 4$ ciclos que serão utilizadas não só no processo de classificação como para a definição e referência de outros algoritmos como a direcionalidade e perda de oscilação.

5.2 - Algoritmo de Classificação

Essa parte do algoritmo é mostrada de forma geral no diagrama de blocos da Figura 5.2.1 abaixo com seu detalhamento mostrado no capítulo 4. O que convém ressaltar aqui é que a lógica principal do mesmo é acrescentada pela medição de seqüência negativa com o objetivo de detectar curtos fase-terra com baixos valores de corrente devido à conexão em delta do transformador entre os dois sistemas conforme mostrado na Figura 2.1.1.

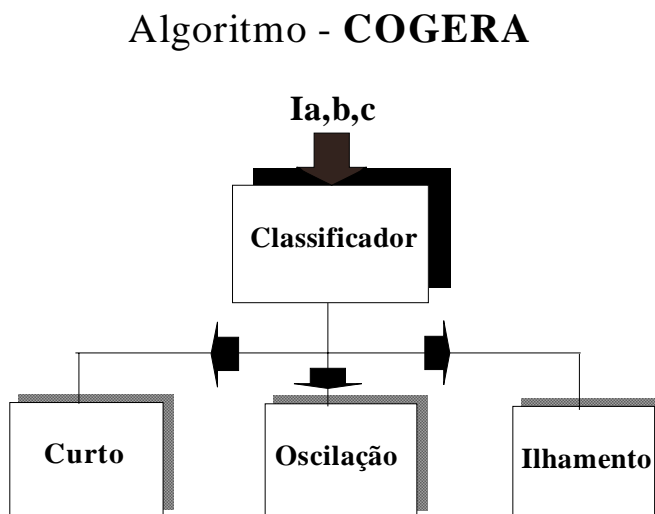


Figura 5.2.1 - Diagrama de Blocos - Classificação

Portanto, uma vez corrida a classificação, tem-se uma das condições descritas abaixo :

Curto : Uma vez classificado como curto , o próximo passo é determinar onde ocorreu o mesmo, se na concessionária ou na indústria. Nessa etapa passa-se a aquistar também os sinais de tensão para implementar a direcionalidade do defeito.

Para a direcionalidade, usa-se o algoritmo do ítem 5.3 a seguir através da variações instantâneas dos sinais ΔI e ΔV , e, se o mesmo for na concessionária, toma-se a decisão de abrir o disjuntor DI da Figura 2.1.1. O tempo de coordenação T_f mostrado deve servir como uma função *back-up* para isolar a contribuição da concessionária para um curto na indústria, devendo ser coordenado com as demais proteções existentes na indústria.

Oscilação : Nessa condição, procura-se por meio das lógicas mostradas no ítem 5.3 calcular as grandezas que permitem determinar se ultrapassou-se o ponto limite da curva de estabilidade entre os dois sistemas, onde em caso afirmativo abre-se sem temporizações o disjuntor DI. Convém observar que se captura as formas de onda de tensão nessa condição operativa para possibilitar o cálculo da potência entre os sistemas conforme mostrado no ítem 5.4.2.

Ihamento : Como essa condição operativa é por si só autoexplicativa com relação à sua ocorrência, uma vez a mesma ocorrida, o algoritmo tomará a decisão de abrir o disjuntor DI da Figura 2.1.1 sem acréscimo de lógica adicional e temporizações.

Por último, se o algoritmo partiu e não foi classificada nenhuma condição citada acima, mede-se a componente de seqüência negativa para se detectar e cobrir um provável ajuste um pouco mais alto dos coeficientes do nível 3 para o curto. Nessa etapa, supõe-se que essa lógica possa cobrir principalmente defeitos fase-terra e fase-fase com uma impedância maior não só na concessionária como na indústria.

Requer-se também que a respectiva variação de energia ou do módulo da corrente seja positiva para se evitar operações indevidas devido a variações de cargas onde possa haver uma partida por variação de energia com um baixo ajuste.(Diagrama de blocos da Figura 5.1)

5.3 - Algoritmo de Localização do Defeito

Neste ítem, parte-se da suposição de que a classificação do defeito já foi efetuada, como mostrado na Figura 5.2.1, e que o evento ocorrido é um curto-circuito. Nesse caso, os sinais de tensão e corrente gerados pela falta passam a ser processados pelo algoritmo de localização de defeito, em que a principal função desse módulo é determinar onde a falta ocorreu, seja na concessionária, ou na planta de cogeração, e para tanto utiliza os conceitos de comparação direcional citado em [12].

Para etapa de localização da falta na concessionária ou na indústria avaliou-se primeiramente a possibilidade da utilização de um relé de distância localizado na interligação e para tal utiliza-se o método de Fourier de 1 ciclo, para se obter as componentes fundamentais das correntes e tensões. Por meio da localização dos respectivos ângulos no primeiro (curto na concessionária) e no terceiro quadrante (curto na indústria), pode-se identificar a localização da falta.

Entretanto, a limitação aplicativa para a utilização do conceito de impedância deve-se principalmente ao pequeno comprimento das linhas de interligação entre os dois sistemas (Linhas 1 e 2 da Figura 2.1.1), o que implica em valores muito baixos de impedância de defeito, além de se necessitar de uma precisão no mínimo igual à obtida para curtos ao longo da linha para defeitos próximos ao ponto de origem no diagrama R-X, problemas normalmente encontrados nos algoritmos de proteção de linhas de transmissão atualmente existentes no mercado.

Cabe analisar, agora a proposta feita pela maioria das especificações das concessionárias existentes até o momento [38,39], que é a utilização de uma função ANSI (67) direcional de fase em conjunto com uma função 59 - N para cobrir os defeitos fase -terra por tensão de seqüência zero na concessionária. Convém ressaltar que as mesmas, por terem sido elaboradas a pelo menos alguns anos, se baseiam em conceitos de relés eletromecânicos onde a medição efetiva das correntes se dão por correntes e tensões de seqüência positiva e zero respectivamente.

Na Figura 5.3.1 a seguir, é mostrado através de um diagrama vetorial o conceito típico dessa proteção (função ANSI 67/67-N), em que a medição para o relé digital é feita na freqüência de 60 Hz, utilizando-se os filtros seno e cosseno citados e, em seguida a medição entre os ângulos das correntes e tensões. Para defeitos fase-terra, utiliza-se a medição da corrente faltosa com a tensão fase-fase das outras fases sãs para garantir essa medição para curtos muito próximos à localização da proteção.

A corrente aplicação dessas duas funções para a proteção contra defeitos nas linhas de interligação com a concessionária, apesar de estarem em uso até o presente em sua grande maioria, apresentam algumas limitações operativas conforme descrito a seguir. Para a função de tensão (59 - N), necessita-se de um tempo de coordenação relativamente alto com as demais proteções existentes na planta.

Referente à função (67), apesar das proteções digitais existentes hoje no mercado apresentarem mais recursos do que as proteções eletromecânicas, como mais alternativas para o tipo de curva além do tempo definido para a corrente (Muito Inverso, Extremamente Inverso,etc...), continua a apresentar um elevado tempo de atuação e de coordenação se comparada com a principal necessidade operativa que é o tempo morto do religamento da concessionária conforme mostrado no item 2.2.1.

Pesquisou-se, portanto, uma proposta que pudesse ser rápida e, ao mesmo tempo, ter sensibilidade o suficiente para enxergar todos os tipos de defeitos inclusive o fase-terra independente do tipo de conexão do transformador da Figura 2.1.1. A princípio, o esquema de comparação direcional, utilizado para proteção de linhas de extra-alta tensão e discutido por Prakash [12], apresenta a idéia básica de extrair as componentes ΔI e ΔV dos sinais de corrente e tensão respectivamente, após a ocorrência do defeito e formado pelas componentes de pré e de pós-falta.

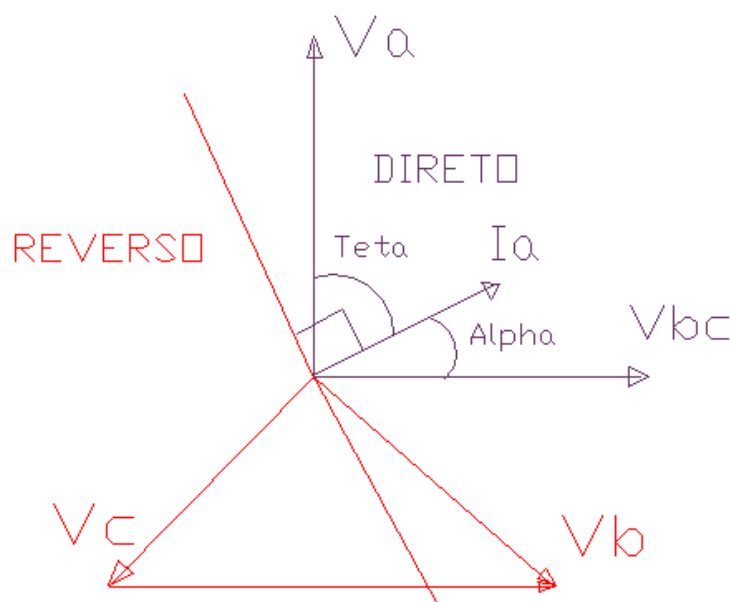


Figura 5.3.1 - Diagrama Vetorial do relé direcional

Nota : Na Figura 5.3.1 acima, Alpha é o ângulo de máxima sensibilidade e Teta o respectivo ângulo de curto - circuito.

Esses desvios nos sinais das tensões (ΔV) e correntes (ΔI) são gerados pela ocorrência da falta, como indicado na Figura 5.3.2. Esse circuito é obtido, aplicando-se o princípio da superposição em um sistema constituído por uma linha de transmissão, alimentada por geradores equivalentes nas duas extremidades, em que ocorre um curto fase-terra no meio dessa linha (Sentido Direto), considerando-se a proteção instalada no terminal A.

As componentes superpostas das tensões e correntes (ΔV e ΔI) são obtidas, considerando-se o circuito da Figura 5.3.2 alimentado através de um único gerador, instalado no ponto da falta, com tensão igual a $-V_p$, cuja tensão é a de pré-falta nesse ponto, com as fontes dos geradores equivalentes nas duas extremidades curto - circuitadas.

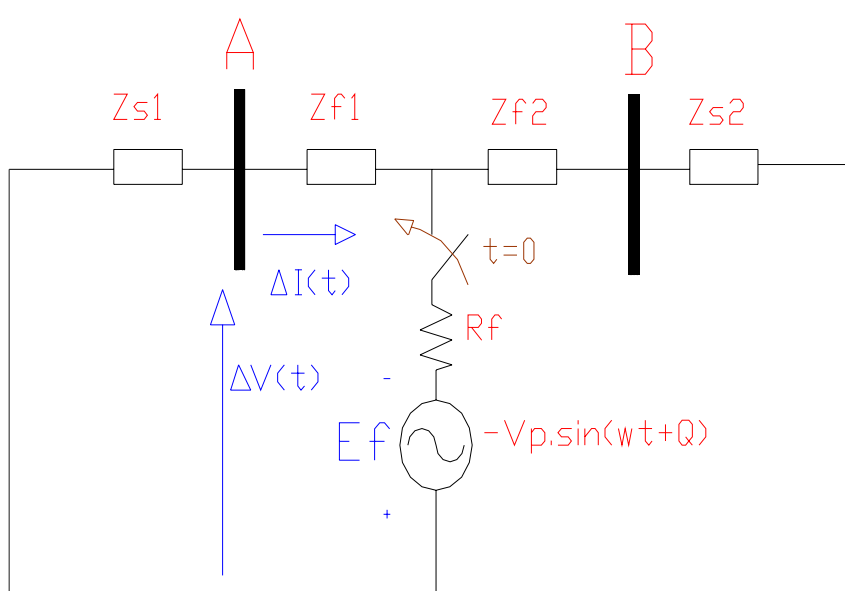


Figura 5.3.2 - Diagrama do Esquema de Comparação Direcional

Os desvios de corrente e tensão ΔI e ΔV produzidos pela falta em função do tempo são expressos por :

$$\Delta V(t) = V(t) - V_p(t) \quad (33)$$

$$\Delta I(t) = I(t) - I_p(t) \quad (34)$$

Onde $\Delta I(t)$ e $\Delta V(t)$ são as variações de corrente e tensão gerados pela falta, $V(t)$ e $I(t)$ os valores de pós-falta e $I_p(t)$ e $V_p(t)$ os valores de pré-falta.

Suporemos também que $\Delta I(v)$ represente ΔI defasado em fase pelo ângulo da impedância de fonte Z_{sI} . Pode-se, portanto, estabelecer critérios de direcionalidade a partir do momento em que ΔI e $\Delta I(v)$ têm sinais contrários (sentido direto) e mesmo sinal (sentido reverso).

Portanto, para uma falta direta vale a relação $|\Delta V + \Delta I(v)| < |\Delta V - \Delta I(v)|$. Já para uma falta reversa a desigualdade torna-se $|\Delta V + \Delta I(v)| > |\Delta V - \Delta I(v)|$. A partir desses resultados, pode-se definir o discriminante de direcionalidade ($ADIS$) por meio da expressão abaixo :

$$ADIS = \left| \Delta V + \Delta I(v) \right| - \left| \Delta V - \Delta I(v) \right| \quad (35)$$

Dessa forma, a direção do defeito, direto ou reverso, é determinada pela comparação do valor calculado acima com ajustes positivos (sentido reverso) ou negativos (sentido direto). A equação 35 baseia-se somente na componente fundamental dos sinais ΔI e ΔV , sendo as altas frequências do sinal de tensão e corrente removidas por um filtro digital no tempo com frequência de corte de 65 Hz.

Para se obter $\Delta I(v)$ a partir de ΔI , deve-se defasar ΔI de um ângulo igual ao ângulo de impedância da fonte da Figura 5.3.2. Essa operação pode ser feita com a expressão abaixo para um instante k qualquer :

$$\Delta I(v)_k = R_p \cdot \Delta I_k + L_p \cdot \frac{\Delta I_k - \Delta I_{k-1}}{T} \quad (36)$$

Em que R_p e L_p representam a impedância da fonte e T é o inverso da frequência de amostragem que no algoritmo COGERA é de 16 amostras/ciclo ou 960 Hz.

Apesar do ângulo da impedância de fonte da Figura 5.3.2 variar com o número de linhas e transformadores conectados à barra A, procura-se reproduzir na impedância réplica um ângulo entre 75 e 85 graus para que os sinais ΔV e $\Delta I(v)$ possam ficar o máximo em fase ou em anti-fase, dependendo do defeito.

Com objetivo de se avaliar o método proposto, simulou-se, com a utilização dos *softwares* ATP e MATLAB, defeitos trifásicos francos nos terminais do gerador e no meio da linha de transmissão 1 da Figura 2.1.1, bem como o algoritmo mostrado no diagrama de blocos da Figura 5.3.5 que contempla as proposta mostrada ao longo do item.

Os resultados obtidos estão mostrados nas Figuras 5.3.3 e 5.3.4 a seguir, tomando-se ajustes de referência para os defeitos em ambos os sentidos.

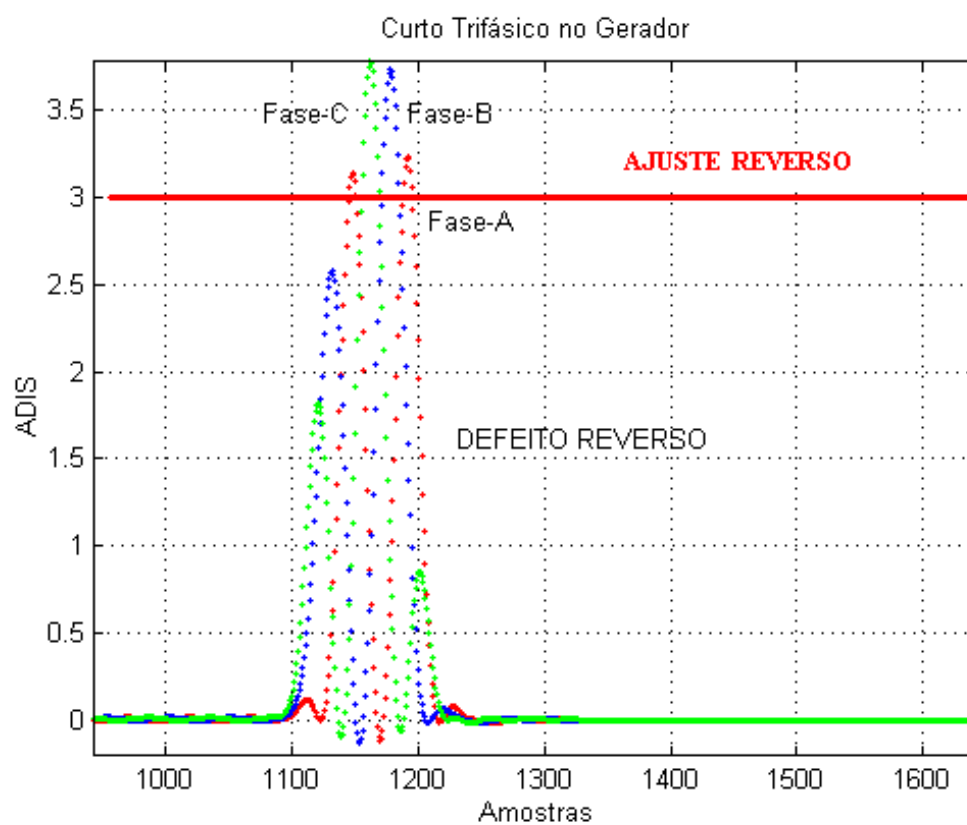


Figura 5.3.3 - Curto trifásico no gerador da indústria.

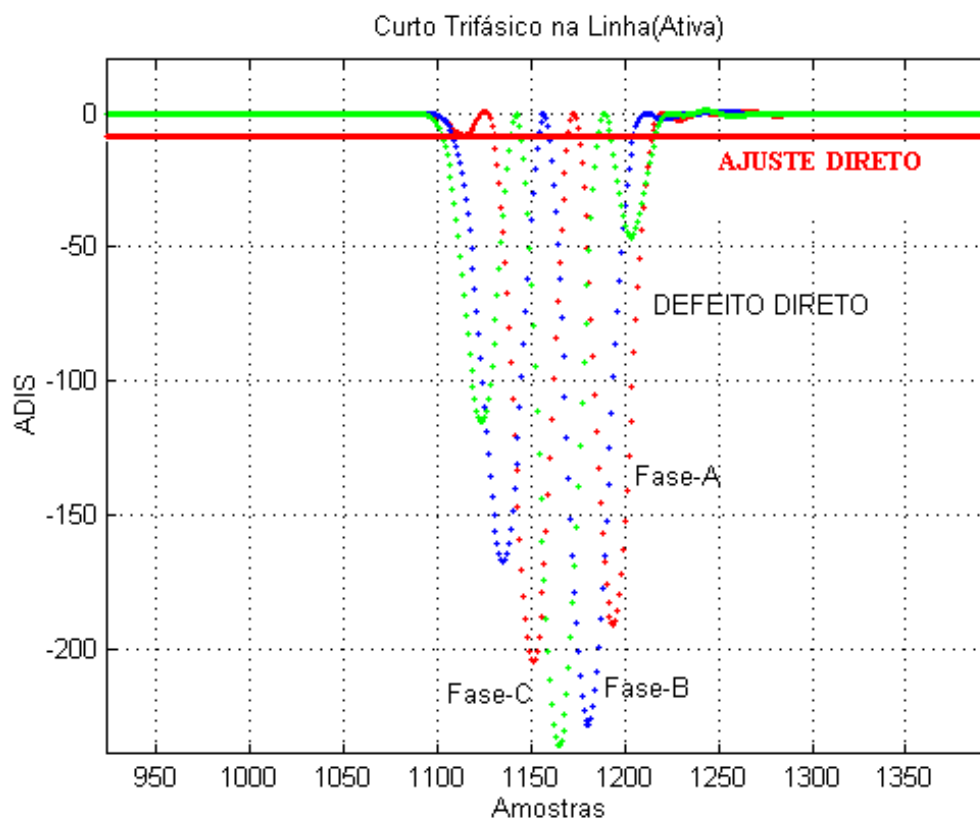


Figura 5.3.4 - Curto trifásico na linha(Ativa).

Pode-se notar, pelos gráficos acima, que o critério proposto se apresenta bem delineado quanto ao aspecto direcionalidade, definindo claramente as regiões de operação no sentido direto (*forward*) e reverso (*backward*).

O diagrama de blocos referente à implementação computacional do algoritmo de direcionalidade proposto é mostrado na Figura 5.3.5. As variáveis N_a e N_d utilizadas nesse diagrama referem-se à posição das amostras inicial e final da janela de 3 ciclos localizada em torno da ocorrência de falta. O valor dessas variáveis é fornecido pela rotina de partida conforme o item 5.1 e a Figura 5.1.8.

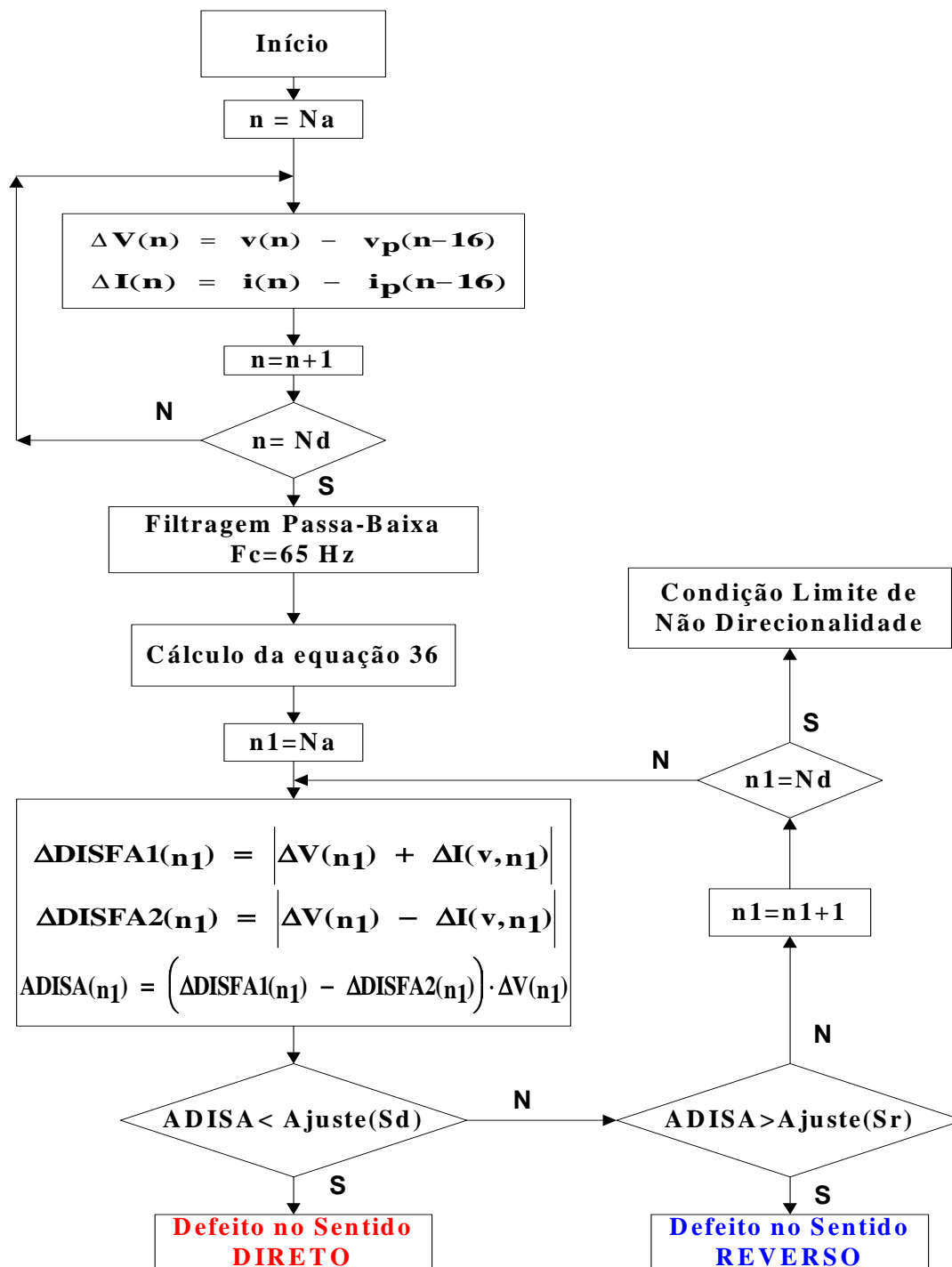


Figura 5.3.5 - Diagrama de Blocos - Direcionalidade

Os passos descritos na Figura 5.3.5 constam das seguintes etapas :

- Definição da ocorrência do evento de curto - circuito.
- Obtenção das amostras N_a e N_d conforme indicado na Figura 5.1.8.
- Geração dos sinais ΔI e ΔV entre as janelas ($N_a - 16$) e N_d .
- Filtragem Passa-Baixas dos sinais de corrente e tensão com frequência de corte de 65 Hz.
- Multiplicação dos sinais de corrente pela impedância réplica dada pela equação 36. Simulações efetuadas indicaram que para o circuito da Figura 5.3.2 as impedâncias da indústria (Z_{sI}) apresentam-se como tipicamente indutivas, apresentando melhor desempenho para discriminação de direcionalidade para $R_p = 0$.
- Obtenção dos discriminantes $\Delta DISFA1$, $\Delta DISFA2$ e $ADISA$ e a posterior definição da direcionalidade.

Na referência [12] no ítem discussões, Mr. Maclaren sugere em seu trabalho mostrado em [07] que se pode melhorar a sensibilidade do algoritmo, multiplicando os discriminantes acima por ΔV . Essa proposta foi implementada no algoritmo COGERA

5.4 - Algoritmo de Oscilação Eletromecânica

Sob o ponto de vista de proteção de sistemas elétricos, o fenômeno de oscilação de potência é normalmente medido e avaliado no diagrama de impedâncias R-X e diferenciado de outras ocorrências, principalmente o curto - circuito, pela velocidade com que esse vetor impedância excursiona sobre esse plano, permitindo identificar claramente a condição de bloqueio ou atuação da respectiva proteção para essa condição operativa.

Referente à proteção da interligação concessionária - indústria alguns trabalhos [05,10,11] procuram reduzir esses dois sistemas (Circuito da Figura 2.1.1) à condição de um equivalente com duas máquinas visando aplicar os conceitos de medição de estabilidade pelo método das áreas iguais mostrado ao longo desse ítem.

Para defeitos próximos e devido ao fato de que a concessionária é um barramento infinito na maioria dos casos, é necessário que o gerador seja desconectado da interligação, pois em alguns casos a corrente de oscilação no gerador pode ser maior do que a sua máxima contribuição para um curto trifásico, além do que o mesmo pode ficar exposto à tempo de atuação alto como de proteções de sobrecorrente com valores de atuação que variam entre 0.5 e 1s.

Portanto, deve haver uma proteção que detecte essa condição em um tempo menor para evitar o *stress* torcional em seu eixo com consequente redução de seu tempo de vida útil.

Outro aspecto a ser analisado é o fato da configuração concessionária - indústria adicionar pelas suas características operativas de um gerador de pequeno porte conectado a outro de médio/grande porte (geração equivalente da concessionária) *blindings* ou regiões específicas de atuação no diagrama de impedâncias R-X, criando critérios de ajustes relativamente complexos, principalmente se a razão do escorregamento do ângulo do rotor (*Pole slipping*) for muito alta.

Em face do exposto acima , para o algoritmo COGERA, pesquisou-se duas outras linhas de aplicação, sendo comparadas então as propostas de Redfern [31] e Minakawa [35]. Ambas as propostas são viáveis, mas [35] se mostrou mais simples de fácil implementação.

5.4.1 - Introdução

Para a obtenção do gráfico das áreas iguais, será desenvolvido em seguida uma teoria básica sobre o fenômeno em pauta. A oscilação em questão pode ser descrita pela equação eletromecânica do gerador mostrada abaixo :(Ver [1] , págs 506 a 508).

$$P_{Inércia} + P_{Eletromagnética} = P_{Eixo} \quad (37)$$

Onde da teoria obtêm-se :

$$P_{Inercia} = P_j \cdot \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} \text{ e } P_j = J \cdot \frac{2}{Polos} \cdot \frac{2 \cdot \Pi \cdot n}{60} \quad (38)$$

Para ;

J = Momento de inércia.

P_j = Potência por unidade de aceleração.

n = velocidade em RPM (Rotações por minuto).

δ = Ângulo entre os estator e rotor do gerador.

A $P_{eletromagnética}$ é composta por outras duas componentes. A potência de amortecimento, que é a variação linear $d\delta/dt$ da velocidade síncrona, e a potência síncrona resultante do funcionamento da máquina, que é dada por $P_m \cdot \text{sen}(\delta)$.

Logo a equação 37 se torna :

$$P_j \cdot \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + P_d \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} + P_m \cdot \text{sen}(\delta) = P_{eixo} \quad (39)$$

Essa equação é não-linear e sua análise mais usual é realizada pelo método das áreas mostrado na Figura 5.4.1.1, em que considerando o amortecimento desprezível, pode-se utilizar a interpretação gráfica da energia armazenada na massa girante como um auxílio na determinação do máximo ângulo de oscilação e a manutenção do sincronismo entre os dois sistemas.

Por esse mesmo critério, tem-se para uma oscilação estável que o ponto de operação da máquina não deve ultrapassar o ponto-E. Sob o ponto de vista operativo, o ângulo δ_1 é o ângulo de incidência da falta e δ_2 , o ângulo de isolamento do defeito. Quanto maior for este ângulo maior será a área “A” e menor será a área “B”. Quando a área A supera a área B o sincronismo é perdido.

Se o ponto-E pode ser identificado em termos das quantidades terminais da máquina, a condição de perda de estabilidade também poderá ser determinada. Esse ponto-E corresponde à saída da potência elétrica P_e , igualando a saída de potência mecânica P_m .

A instabilidade ocorre quando este ponto ultrapassa o ponto-E da Figura 5.4.1.1. O algoritmo COGERA utilizará esta técnica para detectar a perda de sincronismo entre os dois sistemas.

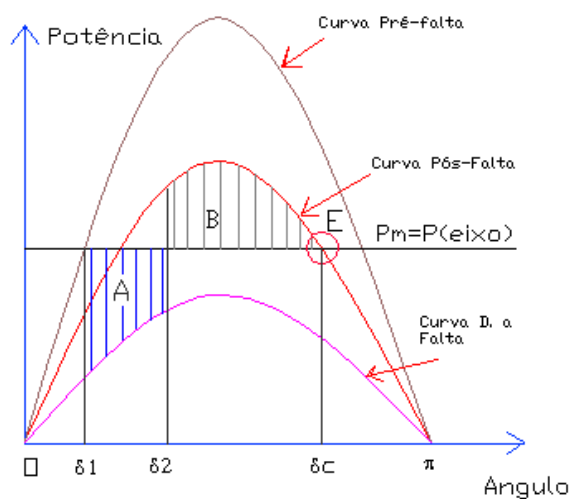


Figura 5.4.1.1 - Curva de Estabilidade do Sistema

5.4.2 - Algoritmo de Minakawa

A proposta de Minakawa [35] consta basicamente de medir o sentido da variação da potência e da corrente na interligação entre os dois sistemas. Pode-se portanto obter a potência de regime $P_o = P_m$ antes da ocorrência do distúrbio e, se o ponto desloca-se sobre a curva no sentido da esquerda para a direita, pode-se obter a variação dos sinais das grandezas em questão (potência e corrente) para em seguida calcular as grandezas $P - P_o$, ΔP e ΔI , que possibilitem identificar a condição da passagem do ponto P pelo ponto - E.

Seja a Figura 5.4.2.1 a seguir com a simulação de três pontos sobre a curva de estabilidade tomados como exemplo :

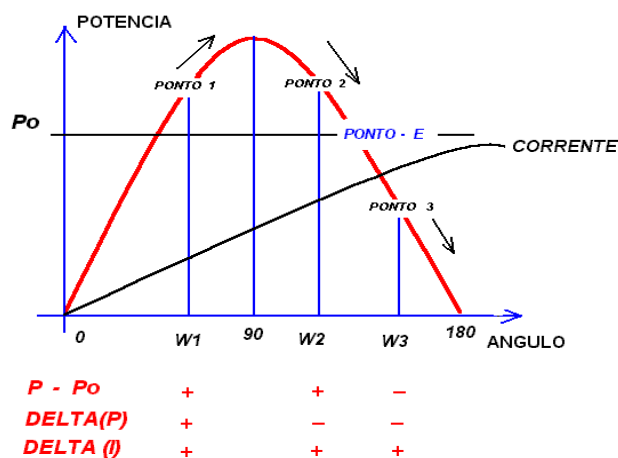


Figura 5.4.2.1 - Exemplo para três pontos - Curva de Estabilidade.

As informações contidas no gráfico acima para os três pontos indicados na curva ($W1, W2, W3$) mostram que a medição das três grandezas ($P, P_o, \Delta P, \Delta I$) no tempo podem diferenciar a condição desejada de perda de sincronismo ($W3$), quando essas grandezas apresentam os valores mostrados na tabela abaixo do gráfico da Figura 5.4.2.1.

Portanto, o algoritmo COGERA necessita calcular as grandezas acima mencionada de forma confiável e segura. Para o evento P_o que representa a potência de regime, adotam-se os seguintes critérios :

- Uma vez partido o algoritmo conforme mostrado no item 5.1, captura-se a amostra Na da Figura 5.1.8. Em seguida, retornam-se 3 ciclos anteriores à essa amostra para garantir que a medição da potência seja feita na condição do sistema em regime permanente. Posteriormente, calculam-se os valores da componente de 60 Hz usando o algoritmo de Fourier de 1 ciclo dos sinais de corrente e tensão para a obtenção de P_o a partir da amostra $n=(Na-48)$, já que o algoritmo COGERA trabalha com uma frequência de amostragem de 16 amostras/ciclo.

A seguir, são apresentadas as equações utilizadas no processo descrito :

$$I_{a1} = \frac{1}{16} \cdot \sum_{n=Na-48}^{Na-33} I_{an} \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi}{16}\right) \cdot n} \quad (40)$$

Para o cálculo da DFT acima, toma-se como exemplo o sinal de corrente da fase-A, sendo esse conceito estendido para as demais fases de corrente e tensão (Para maiores detalhes sobre a DFT ver [24]). Da teoria e da operação com complexos mostrada acima, pode-se obter os respectivos módulos e fases das correntes e tensões dadas por :

$$I_{a60} = \sqrt{I_{ac1}^2 + I_{as1}^2} \quad (41)$$

$$\Phi_{I_{a60}} = \arctan \left(\frac{I_{as1}}{I_{ac1}} \right) \quad (42)$$

Na qual I_{as1} e I_{ac1} , nas equações acima, representam as partes real e imaginária de I_a obtidas de (40) que representa uma operação de filtragem seno e cosseno respectivamente, como mostrado pelas equações abaixo :

$$I_{ac1} = \frac{\sqrt{2}}{16} \left[\sum_{n=Na-48}^{Na-33} I_{an} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{16}\right) \right] \quad (43)$$

$$I_{a_{s1}} = \frac{\sqrt{2}}{16} \left[\sum_{n=Na-48}^{Na-33} I_{a_n} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{16}\right) \right] \quad (44)$$

De posse das componentes fundamental de 60 Hz dos sinais de corrente e tensão em módulo e fase, pode-se calcular P_o a partir de :

$$P_o = \Re \left[V_{an} \cdot I_a^* + V_{bn} \cdot I_b^* + V_{cn} \cdot I_c^* \right] \quad (45)$$

* representa o complexo conjugado dos sinais em questão.

- Executada a etapa anterior e calculada a potência de regime P_o , o próximo passo é estipular o critério de medição das grandezas instantâneas P , ΔP , I e ΔI . Para esses cálculos, adota-se uma janela com início na amostra Na e final ($Na + 320$), ou seja, utiliza-se os 20 ciclos armazenados no processo de classificação da condição de oscilação eletromecânica conforme mostrado no ítem 4.3.

Em seguida, calcula-se a potência P e a corrente I conforme (41) a (45) sobre uma janela de 1 ciclo, andando sobre o sinal sem sobreposição, delimitado por Na e ($Na + 320$) amostras, e a cada duas janelas consecutivas calcula-se ΔP e ΔI conforme a seguir :

$$\Delta P(j) = \sum_{j=1}^{19} (P(j+1) - P(j)) \quad (46)$$

$$\Delta I(j) = \sum_{k=1}^{19} (I(j+1) - I(j)) \quad (47)$$

Onde j é o número da janela.

● Por último, se durante o processo anterior ocorrer a condição indicada pelo ponto W3 da Figura 5.4.2.1, haverá saída de abertura do disjuntor DI da Figura 2.1.1. A seguir na Figura 5.4.2.2 é apresentado o respectivo diagrama de blocos da proposta em pauta, em que j é a variável indexadora do número de janelas conforme já citado acima, e z a variável que indexa o número de amostras na janela para o cálculo de Fourier de 1 ciclo para os sinais de corrente e tensão.

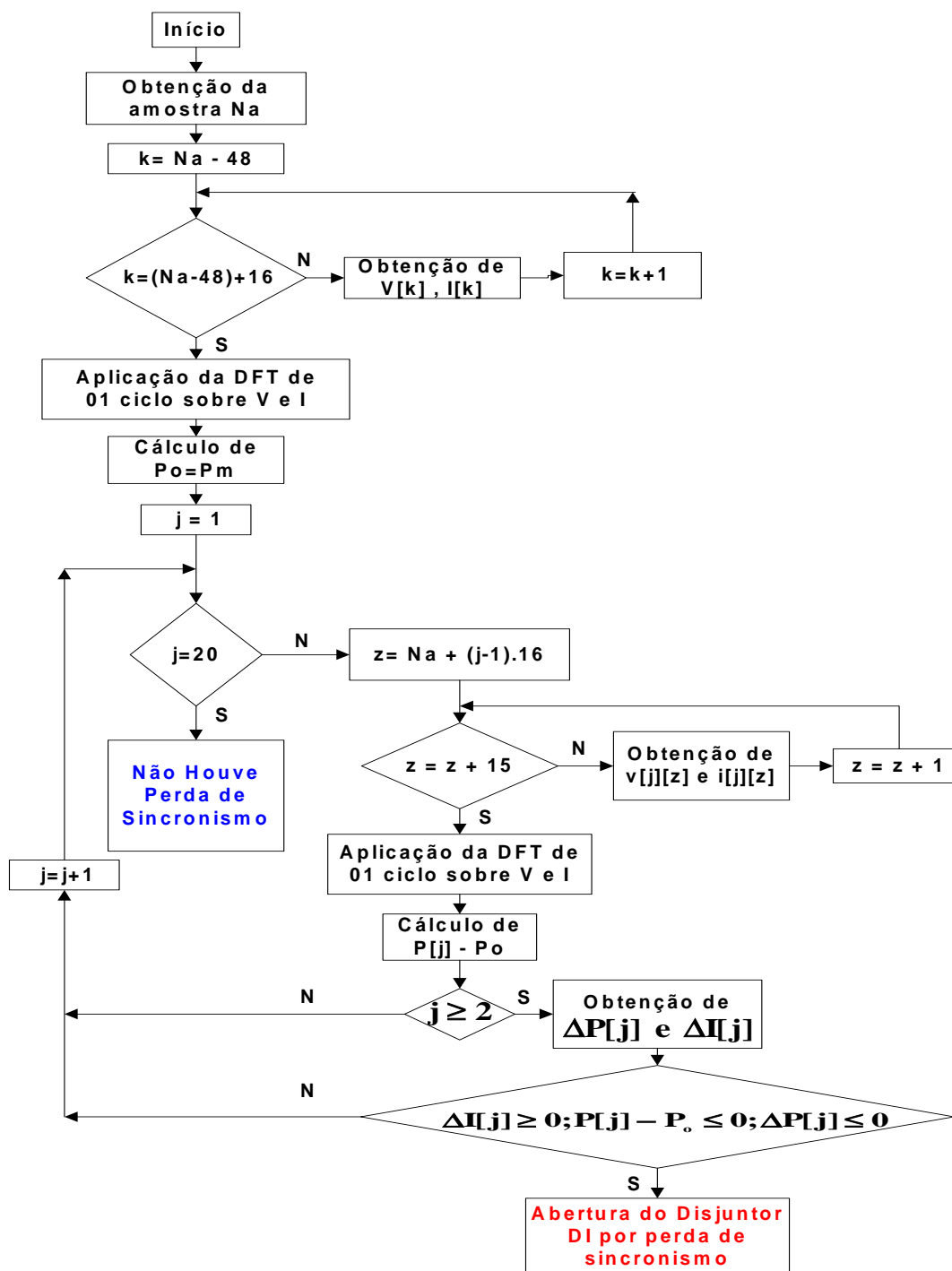


Figura 5.4.2.2 - Diagrama de Blocos - Oscilação Eletromecânica.

5.4 - Ilhamento (*Islanding*)

Para a condição de ilhamento o algoritmo COGERA adotará o conceito de que uma vez classificado o evento por meio dos conceitos mostrados no ítem 4.3.2, em que supõe-se existir harmônicas nos sinais de corrente que por si só já caracteriza uma condição de pouca troca de potência ativa entre os dois sistemas, seja o suficiente para mandar abrir a interligação entre ambos.