

**FRANCISCO ANTONIO REIS FILHO**

**UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DIGITAL PARA  
PROTEÇÃO DA INTERLIGAÇÃO CONCESSIONÁRIA E  
INDÚSTRIA OPERANDO EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO**

Tese apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Doutor em  
Engenharia.

São Paulo  
2002

*FRANCISCO ANTONIO REIS FILHO*

**UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DIGITAL PARA  
PROTEÇÃO DA INTERLIGAÇÃO CONCESSIONÁRIA E  
INDÚSTRIA OPERANDO EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO**

Tese apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Doutor em  
Engenharia.

Área de Concentração :  
Sistemas de Potência

Orientador :  
Eduardo César Senger  
Co-Orientador:  
Euvaldo Cabral Ferreira Júnior

São Paulo  
2002

- Aos meus pais (In memoriam), pela lembrança sempre presente comigo de amor, incentivo e carinho.

- À minha esposa Ivone, e aos filhos, Carolina e Guilherme, pelas horas literalmente roubadas do nosso agradável convívio diário.

## AGRADECIMENTOS

- Ao colega e Prof. Dr. Eduardo César Senger, pelo constante e contínuo estímulo durante toda a execução do trabalho.
- Ao Prof. Dr. Euvaldo Ferreira Cabral Júnior, pela paciência na busca de novas ferramentas para a conclusão deste.
- Ao aluno de graduação e companheiro Eduardo Akira Kinto, sem o qual os programas no MATLAB e em C e C ++ não seriam concluídos.
- À empresa Schaltanlagen-Elektronik-Geräte (SEG), na pessoa de seu Diretor, Sr. Jürgen Schmitz, cuja participação técnica e financeira possibilitou a realização desta pesquisa.

# SUMÁRIO

Resumo	
Abstract	
Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
Lista de Símbolos	
<b>1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 - SISTEMAS DE COGERAÇÃO</b>	
2.1 - Conceitos básicos	3
2.2 - Requisitos para a proteção da interligação	7
2.2.1 - O curto-circuito na concessionária	9
2.2.2 - O curto-circuito na indústria	12
2.2.3 - Oscilação de potência	13
2.2.4 - Ilhamento	14
<b>3 - O ESTADO DA ARTE</b>	<b>15</b>
3.1 - Medição de frequência, tensão e Salto de Vetor ( VS ) ( Algoritmo SEG )	16
3.2 - Proteção multifunção digital ( Algoritmo Beckwith )	22
3.3 - Algoritmo de Redfern/Usta	23
3.4 - Comentários sobre o Estado da Arte	26
<b>4 - CLASSIFICAÇÃO DOS SINAIS</b>	
4.1 - Caracterização e análise espectral dos sinais	27
4.2 - A Transformada Wavelets como ferramenta de Análise espectral	38
4.3 - Utilização da Transformada Wavelets no processo de classificação do algoritmo COGERA	53

<b>5 - DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO</b> .....	64
5.1 - Algoritmo de Partida.....	66
5.2 - Algoritmo de Classificação.....	75
5.3 - Algoritmo de Localização do Defeito.....	78
5.4 - Evento de Oscilação Eletromecânica.....	91
5.4.1 - Introdução .....	93
5.4.2. - Algoritmo de Minakawa.....	96
5.5 - Ilhamento ( <i>Islanding</i> ).....	102
<b>6 - SIMULAÇÕES E TESTES DO ALGORITMO</b> .....	103
6.1 - Simulação do algoritmo COGERA através das formas de onda de corrente modeladas no <i>software</i> MATLAB.....	104
6.2 - Modelamento do Sistema de Cogeração no ATP para a obtenção das formas de tensão e corrente .....	111
6.3 - Simulações do algoritmo COGERA para as formas de onda geradas no ATP	
6.3.1 - Condições de Curto - Circuito, Ilhamento e Oscilação eletromecânica.....	117
6.3.2 - Energização de transformadores e chaveamento de banco de capacitores.....	123
<b>7 -CONCLUSÕES</b> .....	126
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	128

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um algoritmo digital para a implementação da proteção concessionária - indústria operando em sistemas de cogeração, pois abrir o paralelo entre esses dois sistemas é sempre uma decisão difícil, já que essa condição implica em riscos técnicos e econômicos para ambos. A principal contribuição do trabalho é a proposta de uma proteção multi-função com uma visão sistêmica das principais condições operativas, entre as quais se destacam o religamento automático decorrente do curto-circuito na concessionária, a oscilação de potência seguida ao déficit de energia entre os dois sistemas e o ilhamento que é a condição de uma parte das cargas da concessionária serem alimentadas pelo gerador da indústria quando da perda parcial ou total de sua própria alimentação.

Sob o ponto de vista matemático, a impossibilidade do uso de uma só janela de observação para os três fenômenos, devido principalmente as suas características frequenciais ( altas e baixas frequências ), motivou a verificação do conceito de energia, da utilização da transformada Wavelets, e o desvio-padrão dos coeficientes dos seus níveis para a classificação dos eventos, obtendo bons resultados.

Em seguida, através de algoritmos específicos para a localização, tipo e permanência do defeito, medição do ponto de perda de estabilidade na sua curva para a condição de oscilação eletromecânica e medição da quinta harmônica para o ilhamento, obtêm-se o algoritmo COGERA para a proteção da interligação entre os dois sistemas.

## **ABSTRACT**

The present work aims at developing one digital algorithm for the protection of the utility-industry system connection, once the action to open the connection between these two systems is always one hard decision due to the fact this implies both technical and economic risks. The best contribution is the proposal of one multi-function protection with one great systemic view of the main operational conditions, among those it can highlighted the automatic reclosing arising the short-circuit at the utility, power swing followed by one shortage between those two systems, and the islanding that is one operative condition in which some part of the utility loads are supplied by the industry generation.

On mathematical point of view, the impossibility to use just one survey window for the three phenomena listened above owed specially by their frequency attributes ( high and low frequencies ), motivated the checking of the energy concept together with the use of the Wavelet transform and the standard deviation of the coefficients of their levels for the classification of the events, attaining good results.

Afterwards belong specific algorithms for the location of the short-circuits, measuring of the point-E in the stability curve for the power swing, and the fifth harmonic metering for the islanding, it was taken the COGERA algorithm to protect the Utility-Industry connection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 - Diagrama unifilar do sistema concessionária - indústria.....	3
Figura 2.1.2 - Religamento com Sucesso.....	10
Figura 2.1.3a - Tensões após o fechamento do disjuntor 2.....	11
Figura 2.1.3b - Tensões no instante próximo ao fechamento do disjuntor 1.....	11
Figura 3.1.1 - Circuito ilustrativo do Salto de Vetor .....	17
Figura 3.1.2 - Simulação do Salto de Vetor.....	21
Figura 3.1.3 - Simulação da equação 4 - algoritmo SEG.....	21
Figura 4.1.1 - Corrente de Curto - Circuito.....	28
Figura 4.1.2 - Análise Espectral da Corrente de Curto - Circuito.....	29
Figura 4.1.3 - Corrente de Ilhamento.....	30
Figura 4.1.4 - Análise Espectral da Corrente de Ilhamento.....	31
Figura 4.1.5 - Corrente de Oscilação.....	32
Figura 4.1.6 - Análise Espectral - Corrente de Oscilação.....	33
Figura 4.1.7 - Diagrama de Blocos - Modulação.....	34
Figura 4.1.8 - Diagrama de Blocos - Demodulação do Sinal.....	36
Figura 4.1.9 - Saída do Filtro Passa-Baixa - Sinal Demodulado $y_1(n)$ .....	37
Figura 4.2.1 - Função Mãe - Daubechies 10.....	39
Figura 4.2.2 - Escalamento e Translação sobre a função $g(x)$ .....	41
Figura 4.2.3 - Funções Escalamento DB10.....	45
Figura 4.2.4 - Filtro Passa - Baixa.....	51
Figura 4.2.5 - Filtro Passa - Alta.....	52
Figura 4.2.6 - Diagrama de blocos do algoritmo MRA.....	52
Figura 4.3.1 - Decomposição Wavelet para o nível 1 .....	56
Figura 4.3.2 - Decomposição Wavelet para o nível 3 .....	56
Figura 4.3.3 - Decomposição Wavelet para o nível 7 .....	57
Figura 4.3.4 - Diagrama de blocos - classificação do algoritmo COGERA.....	63
Figura 5.1 - Diagrama de blocos do Algoritmo COGERA.....	65
Figura 5.1.1 - Oscilação.....	67
Figura 5.1.2 - Energia/Oscilação.....	67
Figura 5.1.3 - Ilhamento.....	68

Figura 5.1.4 - Energia/Ilhamento.....	68
Figura 5.1.5 - Curto.....	69
Figura 5.1.6 - Energia/Curto.....	69
Figura 5.1.7 - Diagrama de Blocos - Algoritmo de Partida .....	73
Figura 5.1.8 - Energia,Partida e Medição do Algoritmo COGERA.....	74
Figura 5.2.1 - Diagrama de blocos - classificação.....	75
Figura 5.3.1 - Diagrama Vetorial do Relé Direcional.....	80
Figura 5.3.2 - Diagrama do esquema de Comparação direcional.....	82
Figura 5.3.3 - Curto Trifásico no gerador da indústria.....	86
Figura 5.3.4 - Curto Trifásico na linha(Ativa).....	87
Figura 5.3.5 - Diagrama de blocos - Direcionalidade .....	89
Figura 5.4.1.1 - Curva de Estabilidade do Sistema.....	95
Figura 5.4.2.1 - Exemplo para três pontos - Curva de Estabilidade .....	96
Figura 5.4.2.2 - Diagrama de blocos - Oscilação Eletromecânica .....	101
Figura 6.2.1 - Modelamento do circuito no ATP para obtenção das formas de onda..	111
Figura 6.3.1. - Diagrama de blocos da Simulação do algoritmo de partida.....	119
Figura 6.3.2.1 - Corrente de magnetização do transformador.....	123
Figura 6.3.2.2 - Energização do banco de capacitores 10 MVAR/138 KV.....	124

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resposta ao impulso dos filtros passa-alta e passa - baixa.....	48
Tabela 2 - Faixa freqüencial da DWT.....	55
Tabela 3 - Resultado da simulação no MATLAB dos casos de oscilação eletromecânica.....	105
Tabela 4 - Resultado da simulação no MATLAB dos casos de ilhamento.....	107
Tabela 5 - Resultado da simulação no MATLAB dos casos de curto-circuito.....	109
Tabela 6 - Simulações de curto - circuito.....	115
Tabela 7 - Testes de classificação e direcionalidade.....	120

## LISTA DE SÍMBOLOS

DFT .....	Transformada Discreta de Fourier
FFT.....	Transformada Rápida de Fourier
DWT.....	Transformada Discreta Wavelets
ATP.....	<i>Alternative Transient Program</i>
EMTP.....	<i>Eletromagnetic Transient Program</i>
FIR.....	<i>Finite Impulse Response</i>
WDFT.....	<i>Windowed Discrete Fourier Transform</i>
MRA.....	Análise Multi - Resolução
STFT.....	<i>Short Time Fourier Transform</i>

## 1 - INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia nos diversos parques industriais, em conjunto com a recente política de privatização das empresas públicas, tem suscitado cada vez mais a possibilidade de as indústrias gerarem uma ou grande parte das suas necessidades de energia elétrica, visando um menor custo.

Apesar dessa solução estar se popularizando rapidamente, a operação da conexão elétrica entre a concessionária e a indústria ainda apresenta problemas não devidamente solucionados até o presente momento.

Principalmente sob o ponto de vista de proteção, ainda é um grande desafio apresentar uma solução integrada que cubra as possibilidades operativas mais importantes decorrentes dessa interligação, já que algumas dessas indústrias não podem suportar um déficit em seu consumo sem riscos de perdas econômicas.

Esse trabalho, cujo objetivo principal é propor uma solução para a proteção da interligação concessionária - indústria, está organizado em sete capítulos, iniciando-se por essa introdução. No capítulo 2, são discutidos os fenômenos inerentes a um sistema de cogeração e seus aspectos operativos, bem como os sistemas de proteção atualmente mais utilizados.

No capítulo 3, são apresentadas as soluções específicas existentes no mercado ou propostas na literatura para a proteção da interligação.

A principal contribuição do trabalho, apresentada nos capítulos 4 e 5, é a proposição de um algoritmo digital para a implementação da proteção da interligação concessionária - indústria.

Esse algoritmo, denominado COGERA, primeiramente classifica os diversos eventos que ocorrem na interligação, tais como : curto-circuito na linha ; curto-circuito na indústria ; perda de sincronismo e ilhamento. Após essa classificação, o algoritmo identifica as situações que implicam risco de danos para a planta de cogeração ou para os consumidores da concessionária e promove o desligamento da interligação, com a consequente separação entre os dois sistemas.

Para implementar a função de classificação, pesquisou-se novos métodos de observação dos sinais de corrente e tensão, como a análise dos agrupamentos ( *clusters* ), utilizando os coeficientes da FFT, e a Transformada Wavelets. Em seguida, usou-se os conceitos de energia contida nestes sinais, cujo os resultados obtidos são discutidos no capítulo 4. No capítulo 5, é apresentado todo o desenvolvimento do algoritmo em pauta.

Para a simulação e testes do algoritmo proposto, no capítulo 6, modelou-se primeiramente no *software* MATLAB, as formas de onda de tensão e corrente para as principais condições operativas visando obter uma maior sensibilidade aos parâmetros envolvidos nos eventos. Em seguida modelou-se no ATP um sistema concessionária e indústria típico, na qual, através de simulação com esse modelo, se gerou as formas de onda das tensões e correntes para os três principais eventos que podem ocorrer no sistema : curto-circuito, oscilação eletromecânica e ilhamento. Em seguida, são efetuados os testes operativos no algoritmo para as condições operativas citadas e outras julgadas importantes para uma completa visão sistêmica da proteção multi-função.

No capítulo 7, são apresentados os resultados e conclusões do trabalho com sugestões e abordagens que possam servir de base para pesquisas futuras sobre o tema em pauta.

## 2 - SISTEMAS DE COGERAÇÃO

### 2.1 - Conceitos básicos

Na Figura 2.1.1, é apresentada uma configuração típica de uma planta industrial que possui geração própria conectada à concessionária em alta-tensão e que opera em paralelo ou isoladamente para suprir uma parte de seu consumo de energia elétrica.

Essa geração, no Brasil, é feita basicamente por turbinas a gás (usinas petroquímicas), turbinas inseridas no ciclo de vapor ( fábricas de papel e celulose ) e usando bagaço de cana como combustível nas indústrias de açúcar e álcool, onde a potência desses geradores varia em média de 10 a 40 % da potência nominal da planta.

É importante informar que as linhas 1 e 2 da concessionária operam em condições Normal - Reserva e que essa configuração se apresenta como a mais usual no sistema elétrico brasileiro e será, portanto, a adotada ao longo do trabalho.

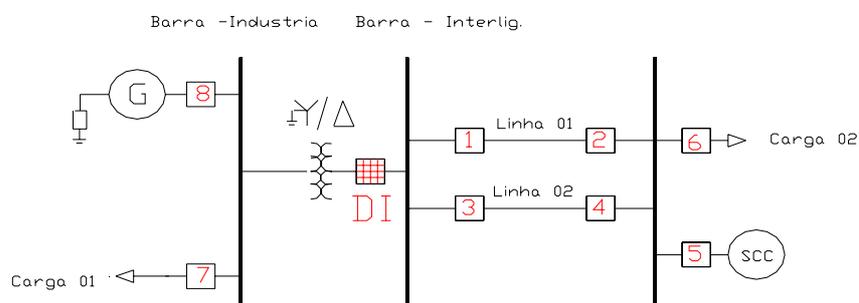


Figura 2.1.1 - Diagrama unifilar do sistema concessionária - indústria.

Sob o ponto de vista operativo em instalações desse tipo, algumas questões precisam ser criteriosamente analisadas e, dentre essas, destacam-se as seguintes :

- o ponto de conexão entre os dois sistemas;
- o sistema de aterramento; e
- os esquemas de proteção.

Referente ao ponto de conexão, os sistemas interligados na alta-tensão representam uma condição mais favorável sob o ponto de vista da proteção da interligação, pois a impedância do transformador diminui a contribuição de curto da concessionária para um defeito no gerador.

No sistema de aterramento do gerador, a resistência limita o valor de faltas para à terra e reduz a circulação de corrente de terceira harmônica gerada. No transformador, a conexão em delta na alta-tensão serve para limitar a contribuição do gerador da indústria para um curto fase-terra na concessionária.

Sob o ponto de vista de proteção desse sistema, as funções mais utilizadas no gerador da indústria são :

- 50/51- sobrecorrente;
- 67 - sobrecorrente direcional;
- 27/47 - subtensão e falta/sequência de fases;
- 81 - frequência absoluta;
- 25 - sincronismo;
- 32 - reversão de potência; e
- 40 - perda de excitação.

Para a proteção da interligação entre os dois sistemas, as normas citadas em [36,37,38,39,40], requerem de uma forma geral as seguintes funções para atuar no disjuntor DI da Figura 2.1.1;

67 - Sobrecorrente direcional de fase com a função de detectar um defeito entre fases na concessionária e abrir a interligação entre os dois sistemas antes que o religamento dos disjuntores 1 ou 3 ( função ANSI 79 ) da Figura 2.1.1 ocorra. As normas deixam claro que a efetiva sincronização do disjuntor DI fica sobre inteira responsabilidade da indústria, sendo, entretanto, um requisito fundamental da concessionária para permitir a conexão entre os dois sistemas. Cabe ressaltar também que o critério de ajustes da função 67 deve ser bem coordenado com as características do sistema, níveis de curto - circuito e o tempo morto de religamento da função 79 da concessionária.

59/N - Sobretensão de seqüência zero, obtida através de uma conexão em delta aberto, na barra de alta - tensão para complementar a função 67 em condições de defeitos ou fugas para à terra no sistema de concessionária.

25 - Função de *check* de sincronismo para a garantia da correta conexão dos dois sistemas após a atuação de alguma das funções 67, 59/N, 81 e 78 que atuam no disjuntor DI da Figura 2.1.1.

81 e 78 - Função de frequência e Salto de Vetor ( *phase displacement* ).

Essas funções são citadas indiretamente no ítem 6.3.3 de [40], e descritas como funções que garantem uma efetiva desconexão da indústria em caso de desenergização das linhas 1 e 2 que caracterizem um desbalanço de energia ou uma perda total ou parcial da concessionária.

Os critérios de ajustes dessas funções ficam também dependentes do tempo de retorno da tensão da concessionária requerendo uma análise bem detalhada desses tempos. Convém ressaltar que, para essas proteções atuarem de forma efetiva, é necessário a circulação de um fluxo de potência ativa mínimo entre os dois sistemas.

É importante observar que cada equipamento que faz parte desse sistema, tanto na concessionária ( linhas e transformadores ) quanto na indústria ( gerador, transformadores e cargas ), possui dispositivos próprios de proteção responsáveis pela detecção e isolamento dos mesmos em caso de defeito.

Dessa forma, não existe ainda uma padronização do procedimento dessas funções principalmente no que tange à proteção da interligação. As normas existentes estão de certa forma ultrapassadas e não levam em consideração as novas tecnologias e outras propostas existentes.

Por outro lado, cada concessionária estipula suas próprias regras para a permissão do paralelo entre os dois sistemas, como por exemplo o uso da função 32 ( reversão de potência ) para permitir ou não a alimentação de seu sistema pelo gerador da indústria, com o consequente ressarcimento financeiro do mesmo.

A aplicação correta das funções complementares como o Salto de Vetor exige critérios de ajustes muito sensíveis e difíceis de se calcular, implicando em um critério bastante rigoroso para uma correta aplicação. Por razões desse tipo, a principal linha de pesquisa do trabalho procura enfocar uma visão sistêmica dos eventos citados que possam propiciar uma rápida e correta decisão de abrir a interligação entre os dois sistemas, visando principalmente a integridade do gerador da indústria.

## 2.2 - Requisitos para a proteção da interligação

É norma que a concessionária não assuma qualquer responsabilidade pela proteção dos geradores e equipamentos anexos do consumidor ( indústria ) ( [36],[37] ).

Esse deve ser o responsável pela proteção eficiente de toda a sua instalação, bem como de todos seus equipamentos, de tal forma que faltas ou distúrbios no sistema da concessionária não causem danos aos seus equipamentos. Outra condição relevante para o problema é o fato de que a indústria não pode em nenhuma hipótese energizar os circuitos desenergizados da concessionária. Como consequência dessas normas, a atenção especial deve ser dada às três condições operativas, a seguir, consideradas mais importantes :

- Deve ser evitado o religamento dos disjuntores da concessionária sem que as tensões dos dois sistemas estejam perfeitamente sincronizadas. Essa situação pode ocorrer por exemplo após a abertura e religamento dos disjuntores 1 e 2 da Figura 2.1.1 devido a uma falta na linha 1. Caso os dois sistemas não estejam devidamente sincronizados esse religamento pode produzir solicitações mecânicas severas no eixo do gerador da indústria.

- Evitar o ilhamento da indústria. Essa condição pode ocorrer após a perda da geração da concessionária devido à abertura do disjuntor 5 da Figura 2.1.1, permanecendo alguns consumidores da concessionária alimentados pelo gerador da mesma.

- Oscilações eletromecânicas provocadas por um desbalanço entre geração e carga no sistema da concessionária, produzem solicitações mecânicas no eixo do gerador da indústria. Dependendo da magnitude dessa oscilação, a proteção da interligação deverá abrir a conexão entre os dois sistemas.

É importante observar, nesse momento, uma exigência que consta em algumas especificações das concessionárias referente à necessidade ou não da instalação de um relé de *check* de sincronismo ( função 25 ) no disjuntor da interligação, sob responsabilidade da indústria.

A partir do momento que se considera a existência dessa função, a proteção da interligação deverá abrir sempre o paralelo entre os dois sistemas para um curto de qualquer tipo na concessionária, religando o respectivo disjuntor de interligação DI, após a verificação de sincronismo entre as tensões da indústria e da concessionária após o religamento automático de seus disjuntores. ( Disjuntor 1 da Figura 2.1.1 para um defeito na linha 1 ).

### 2.2.1 - O curto-circuito na concessionária

É de praxe a concessionária proteger as linhas de interligação através das funções 21 ( distância ) e 67/67-N ( direcional de fase e terra ) essa última principalmente para cobrir curtos fase-terra nessas linhas que geralmente são curtas ( 10 km de comprimento em média ) e por último a função 79 ( religamento ), ou seja, a concessionária poderá manter seu religamento automático via essa função.

A indústria deverá, portanto, possuir um esquema de proteção para a abertura rápida do paralelismo ( disjuntor DI ), para, em seguida, sincronizar a tensão da concessionária com a tensão de seu gerador. Um aspecto importante é que a indústria é a única responsável pela correta sincronização de seus geradores com o sistema da concessionária havendo a necessidade de um relé de verificação de sincronismo no disjuntor DI da Figura 2.1.1, conforme já citado anteriormente.

O desgaste torsional, proveniente de uma má sincronização entre os dois sistemas, devido à não abertura do disjuntor DI, após um curto na concessionária seguido de religamento automático, pode provocar danos severos à geração da indústria, com a redução de até 50% no tempo de vida útil da máquina. A título de exemplo, pode se ter uma dimensão do problema operativo citado através de uma simulação com três condições de tempo morto de religamento, tomando-se como base o circuito da Figura 2.1.1. Para tal, supõe-se o gerador da indústria com sua carga nominal de 4 MVA, uma carga na indústria de 0.5 MVA e o respectivo excedente de energia exportado para a concessionária.

Aplica-se um curto circuito trifásico na linha 1 no instante 100 ms, onde o tempo de atuação da proteção dos disjuntores 1 e 2 somadas ao tempo de atuação dos mesmos é de também 100 ms. Supõe-se também que o religamento do disjuntor 2 é instantâneo e o tempo morto de extinção do arco no disjuntor 1 para as três condições é de 200, 600 e 1000 ms respectivamente.

A seguir essa condição é simulada no ATP com o resultado mostrado na Figura 2.1.2.

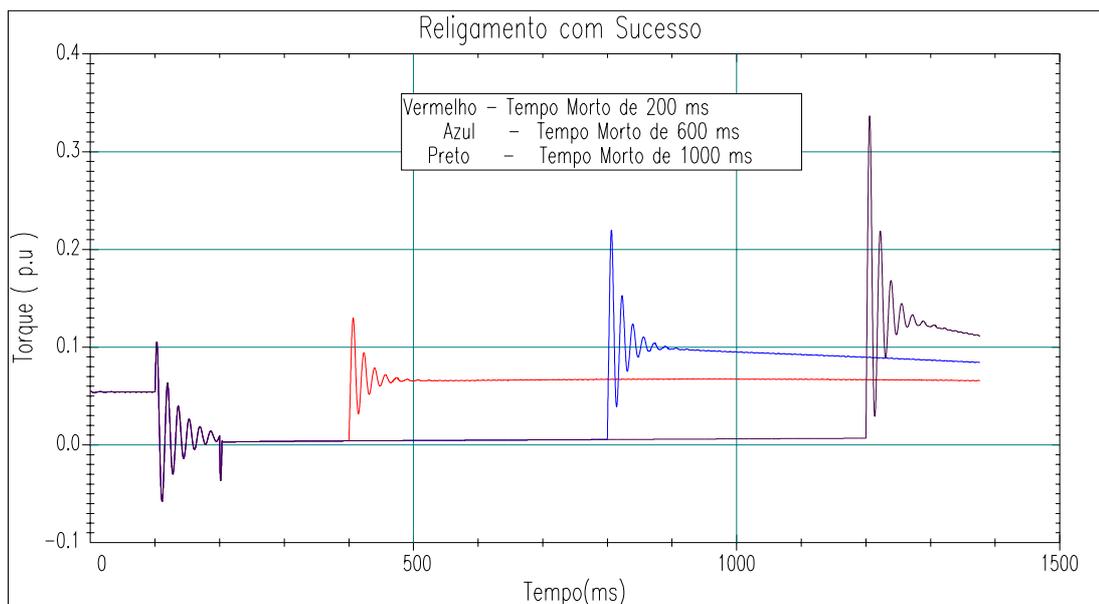


Figura 2.1.2 - Religamento com Sucesso.

Pode-se notar que as oscilações no torque eletromagnético são tanto maiores à medida que o tempo morto de religamento aumenta, e esse fato deve-se à uma diferença cada vez maior em módulo e ângulo entre as tensões de retorno da concessionária e da indústria. Nas figuras a seguir, são mostrados, para a última condição operativa mostrada acima ( tempo morto de 1000 ms ) os respectivos perfis das tensões da indústria e da concessionária no início do evento de *check* de sincronismo, ou seja, logo após a eliminação de defeito na linha pelas proteções da mesma e o fechamento do disjuntor 2 da linha 1 ( Figura 2.1.3a).

Na Figura 2.1.3b, já no final do tempo morto citado, pode-se notar não só uma maior defasagem angular, como principalmente um aumento da diferença entre os módulos das tensões dos dois sistemas.

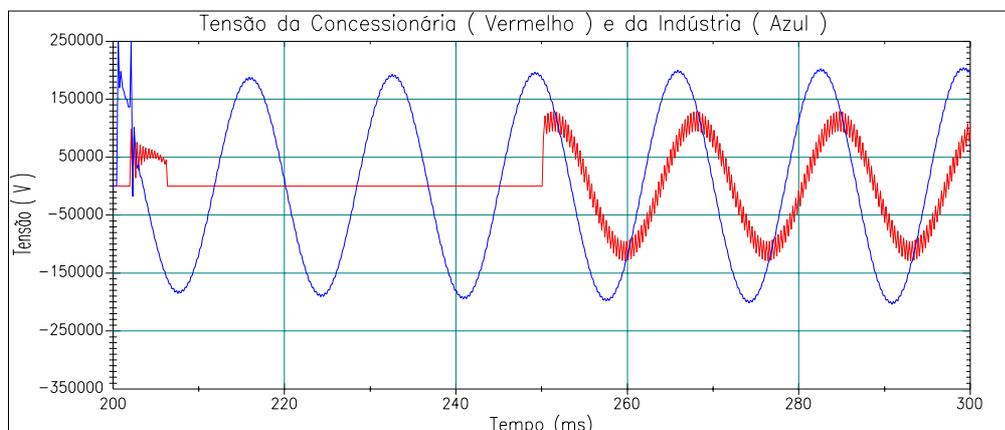


Figura 2.1.3a - Tensões após o fechamento do disjuntor 2

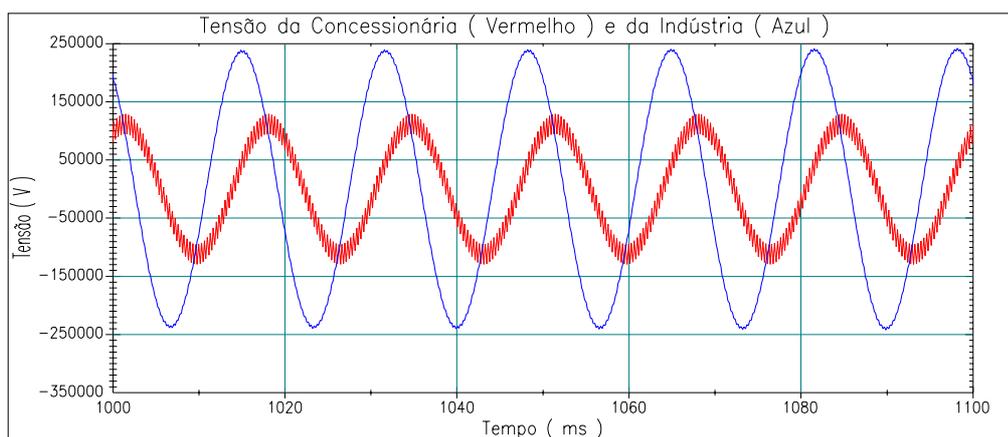


Figura 2.1.3b - Tensões no instante próximo ao fechamento do disjuntor 1.

Em [25], pode-se obter uma abordagem mais completa do religamento, onde é ressaltada a característica probabilística do defeito, como o tipo, localização, duração e o tempo de eliminação, todos esses eventos com impacto no *stress* torsional no eixo do gerador da indústria gerado pela amplitude das oscilações mostradas. Fica claro, portanto, a necessidade de se usar uma proteção rápida e seletiva na interligação, atuando no disjuntor DI da Figura 2.1.1 em conjunto com a função de verificação de sincronismo.

### **2.2.2 - O curto-circuito na indústria**

Para um defeito localizado na planta da indústria, a proteção da interligação deve detectar essa falta e atuar como uma retaguarda (*back-up*) das demais proteções, como o diferencial do transformador, das proteções dos motores de pequeno e médio porte e das principais funções de proteção do gerador da indústria.

Além de operar como *back-up* das proteções existentes nos equipamentos da indústria, a proteção da interligação pode também disponibilizar a função de *breaker-failure* para os disjuntores próximos à conexão em alta-tensão.

Essa função consiste basicamente em através de uma temporização de valor alto ( em média maior do que 300 ms ) servir para eliminar uma falta na indústria ou na concessionária ( Por exemplo um defeito na linha 1 da Figura 2.1.1 no qual, por alguma razão, o disjuntor 1 não abriu provavelmente por problemas mecânicos ). Após essa temporização o disjuntor DI seria aberto para eliminar a contribuição do gerador da indústria para essa ocorrência .

### 2.2.3 - Oscilação de potência

O fenômeno de oscilação de potência ocorre pelo desbalanço entre a potência mecânica ( $P_m$ ) e elétrica ( $P_e$ ) que provoca a aceleração/frenagem do rotor e faz seu respectivo fluxo magnético escorregar em relação ao fluxo do estator que é sincronizado com a rede elétrica.

Se esse escorregamento ocorre de modo muito intenso, a máquina pode perder o sincronismo. Além disso, caso longos escorregamentos sejam permitidos, há o sobreaquecimento da máquina e o aparecimento de correntes de escorregamento no rotor, que afetam principalmente o sistema de excitação.

Esse mesmo evento pode causar também torques pulsantes que produzem desgastes torsionais em seu eixo. Estudos e levantamentos mostram que esse desgaste ocorre durante o período inicial da oscilação torsional e seu eixo se danifica após esse tempo.

Pequenas oscilações torsionais cumulativas levam à uma considerável redução de vida útil da máquina se a usinagem dos eixos não for de certa forma reforçada. Sob o ponto de vista do sistema, se o gerador é conectado a uma fonte fraca por parte da concessionária (baixa potência de curto-circuito na interligação), poderá resultar em flutuações de tensão que ocasionam escorregamento em motores síncronos e perda de velocidade em motores de indução.

Por essas razões, é recomendado que, para a condição operativa em análise, o gerador seja desconectado da concessionária sem atrasos e pelo menos durante o primeiro ciclo de ocorrência da oscilação eletromecânica.

## 2.2.4 - Ilhamento

De volta à Figura 2.1.1, a condição de ilhamento ocorre quando, por alguma razão, se perde a geração da concessionária ( abertura do disjuntor 5 ) e a carga 2, de pequeno ou grande porte, é alimentada pelo gerador da indústria. Se esta carga for de um valor razoável, a variação de potência ativa no gerador pode ser detectada pelos métodos do Salto de Vetor,  $\partial f/\partial t$  ( taxa de variação de frequência ) ou  $\partial p/\partial t$  ( taxa de variação de potência ativa ) apresentadas no capítulo 3, além de outras proteções como sobrecorrente e sub/sobretensão com um tempo maior de coordenação.

Caso, no entanto, a potência absorvida pela indústria antes do ilhamento e a carga 2 forem de baixo valor, não irá ocorrer variações significativas nas principais grandezas elétricas ( potências, correntes, tensões ou frequências ) na interligação, inviabilizando a detecção do ilhamento por qualquer dos algoritmos existentes atualmente.

Esta condição operativa têm de ser detectada por três principais razões :

- A indústria pode não querer alimentar a concessionária, por falta de ressarcimento financeiro por parte da mesma e também para não ser responsabilizada por eventuais danos aos consumidores da concessionária que permanecem energizados pela indústria.
- Pode haver problemas de segurança para a equipe de manutenção da concessionária, pois, quando da abertura desse circuito, supõe-se o mesmo desenergizado, o que não ocorre.
- Evitar o religamento da geração da concessionária sem a devida verificação de sincronismo, ocasionando os problemas operativos mostrados no item 2.2.1.

### **3 - O ESTADO DA ARTE**

Com relação à proteção da interligação, frente aos problemas descritos no capítulo anterior, algumas propostas têm sido apresentadas na literatura :

- filosofia adaptativa proposta por Faried [25];
- aplicação de redes neurais proposta por Aggarwal [18];
- algoritmo da SEG [32];
- algoritmo Beckwith [16]; e
- algoritmo de Redfern [17, 21].

Os dois primeiros itens abordam somente o aspecto do religamento automático. Já os demais algoritmos discutem a proteção da interligação com uma maior abrangência, como o curto circuito na concessionária e a condição de ilhamento. Dessa forma, será feita uma apresentação sucinta apenas dos três últimos métodos.

### **3.1 - Medição de frequência, tensão e Salto de Vetor ( VS ) ( Algoritmo SEG )**

Para os eventos citados na capítulo 2, o fabricante acima propõe um relé multifunção na interligação com as funções de sub/sobretensão, sub/sobrefrequência ( absoluta e com  $\partial f/\partial t$  ) e o Salto de Vetor. Todos esses passos possuem ajustes e temporizações independentes, mas todos literalmente aplicáveis aos eventos de déficit de energia, rejeição de carga e do religamento na concessionária. Essa proteção, alimentada apenas pelo sinal de tensão, pode ser instalada individualmente no gerador ou na barra de interligação entre os dois sistemas. O algoritmo utiliza a FFT para a extração da componente fundamental ( 60Hz ), e todas as decisões são baseadas somente nessa frequência.

Esses conceitos são especialmente aplicáveis para se evitar as falsas passagens pelo zero nas formas de onda de tensão, já que tanto para o cálculo da frequência como para o Salto de Vetor procura-se medir o intervalo entre duas passagens sucessivas pelo zero.

Dentre as três funções utilizadas na proteção, o Salto de Vetor apresenta-se como a mais rápido e efetivo, podendo ser definido pelo fato de que o mesmo é baseado no conceito de que após a perda da concessionária, o ângulo da tensão no ponto de interligação irá variar bruscamente. Essa variação de ângulo é causada pela súbita variação da corrente do gerador.

Esse fenômeno pode ser observado no circuito da Figura 3.1.1, em que, antes da perda da concessionária, o gerador fornecia apenas uma parte da corrente de carga e após a saída desta, passa a fornecer toda a corrente. Sejam  $E_1$  e  $E_2$  as tensões na interligação antes e após a perda da concessionária, respectivamente. Como mostrado na Figura 3.1.1 essas tensões podem ser calculadas por :

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_p - j \cdot x_T \cdot \dot{I}_G \quad (01)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_p - j \cdot x_T \cdot \dot{I}_L \quad (02)$$

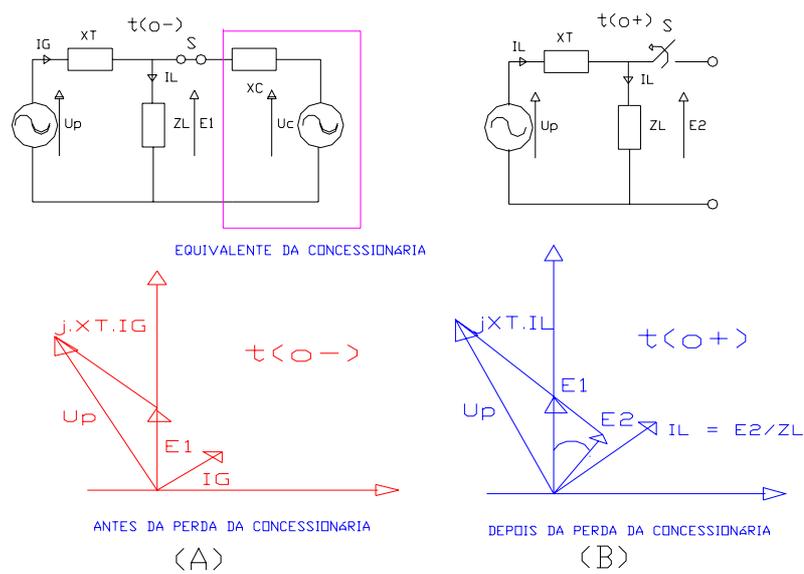


Figura 3.1.1 - Circuito ilustrativo do Salto de Vetor

Onde :

$\dot{U}_p$  - Tensão interna do gerador.

$x_T$  - Reatância total entre o gerador e o ponto de conexão da proteção.

Em seguida o ângulo do Salto de Vetor é dado por :

$$\theta_{VS} = \text{FASE}(\dot{E}_1) - \text{FASE}(\dot{E}_2) \quad (03)$$

Essa função conforme já citado, tem por finalidade detectar as situações em que ocorre o ilhamento do sistema devido à perda da concessionária (causado por exemplo pela abertura do disjuntor 5 na Figura 2.1.1).

No algoritmo SEG, esse princípio consta basicamente de, ocorrido o distúrbio, memorizar um ciclo de tensão de pré-evento e, posteriormente, medir a diferença de tempo entre as passagens pelo zero das tensões de pré e pós evento, utilizando uma referência interna que é sempre ligada à frequência fundamental. É importante ressaltar mais uma vez a necessidade de se eliminar qualquer ruído no sinal de forma a evitar falsas medições na passagem pelo zero.

A seguir, complementando os conceitos mostrados acima, e tomando-se como referência o circuito da Figura 3.1.1, pode-se obter a equação do ajuste desenvolvida por Bauschke [32], para o salto de vetor, na qual se nota que a medição citada depende dos seguintes parâmetros :

$$\theta_{VS} = +\arctan\left[\frac{-x_T \cdot s_{-o} \cdot \cos(\varphi_{-0})}{1 - x_T \cdot s_{-o} \cdot \sin(\varphi_{-0})}\right] - \arctan\left[\frac{-x_T \cdot s_{+o} \cdot \cos(\varphi_{+0})}{1 - x_T \cdot s_{+o} \cdot \sin(\varphi_{+0})}\right] \quad (04)$$

$x_T$  - Reatância total desde o gerador da indústria até o ponto de interligação,

Gerador ( impedância (  $x_d'$  ), transformador elevador e cabos (se houver).

$s_{-0}, s_{+0}$  - Carga aparente do gerador antes e depois da perda da concessionária.

$\varphi_{-0}, \varphi_{+0}$  - Ângulo de carga do gerador antes e depois da perda da concessionária.

Esses requisitos levam à condição de que, apesar da proteção apresentar-se como uma boa solução para a detecção do ilhamento, a mesma necessita de um critério bastante complexo e preciso em seus ajustes para evitar operações indevidas. Outro fato relevante é a sua total dependência do fluxo de potência ativa intercambiada entre os dois sistemas para que essas medições sejam efetivas ( fluxo mínimo entre 10 a 15 % da potência nominal da planta ). Para a condição da concessionária apresentar-se basicamente como uma redundância ( *back-up* ) para a indústria, essas medições não serão efetivas, bem como para a condição de ilhamento mostrada no item 2.2.4 para baixos valores de carga da concessionária alimentadas pelo gerador da indústria.

Na Figura 3.1.2, pode-se visualizar o fenômeno do Salto de Vetor descrito, na forma de onda de tensão, para um defeito na concessionária ( sistema industrial da Figura 2.1.1 ) sem a filtragem digital aplicada às formas de onda de tensão , para eliminar os falsos zeros nesta forma de onda. Pode-se notar claramente o escorregamento da forma de onda de tensão após a ocorrência em relação à tensão de referência.

Como complemento, na Figura 3.1.3, simula-se a equação 4 acima para um sistema com constante de inércia de 3s, impedância total de 0,3(pu) e  $\cos(\Phi) = 0.9$  antes da perda da concessionária e para três condições de  $\cos(\Phi)$  após essa perda.

Nessa figura, o ângulo do Salto de Vetor é apresentado em função da relação  $S_{+0} / S_{-0}$  sendo  $S_L$  a potência aparente consumida pelas cargas da indústria e  $S_{inte}$  a potência aparente que circula pela interligação, podendo-se escrever :

$$S_{-o} = S_L - S_{inte} \quad (05)$$

$$S_{+o} = S_L \quad (06)$$

portanto ;

$$\frac{S_{+o}}{S_{-o}} = \frac{S_L}{S_L - S_{inte}} \quad (07)$$

A expressão acima mostra que caso a potência na interligação seja nula ( $S_{inte} = 0$ ), resulta em  $S_{+0} / S_{-0} = 1$ . Como pode-se observar na Figura 3.1.3, para esse valor o ângulo do Salto de Vetor é nulo.

Portanto, para que essa proteção seja efetiva, é necessário a circulação de uma potência de no mínimo de 10 a 15 % da potência nominal da planta.

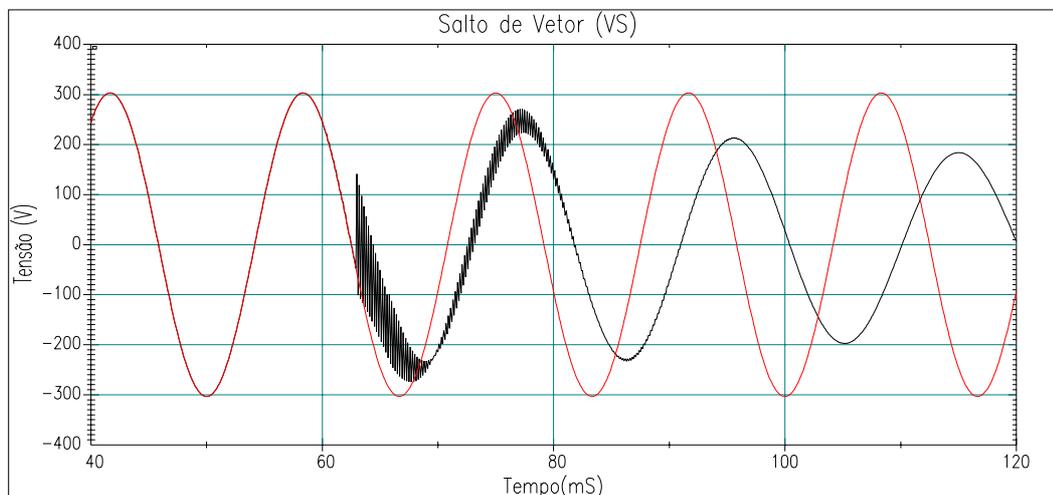


Figura 3.1.2 - Simulação do Salto de Vetor.

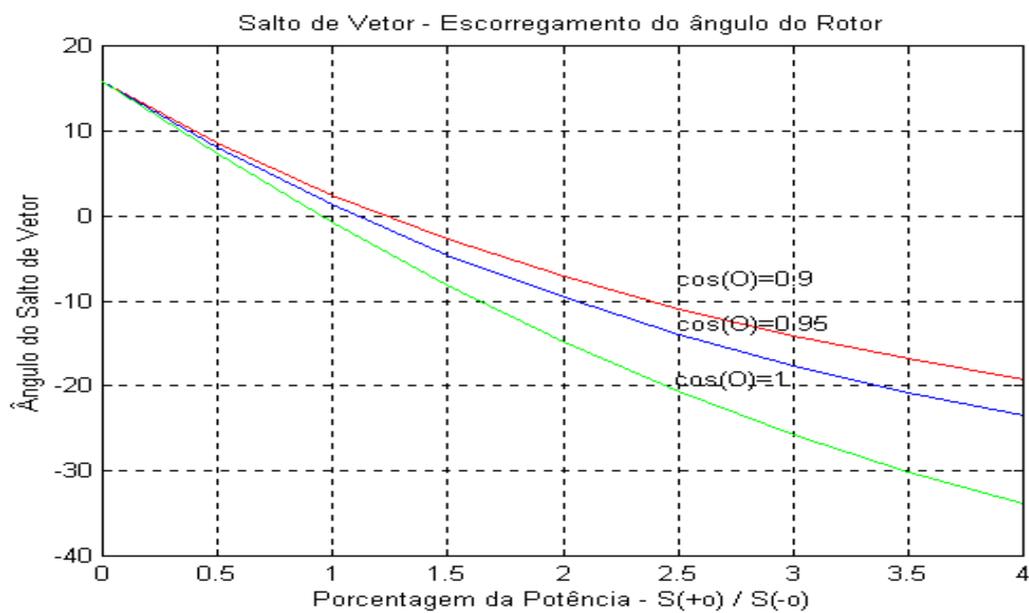


Figura 3.1.3 - Simulação da equação 04 - algoritmo SEG

### 3.2 - Proteção multifunção digital ( Algoritmo - Beckwith )

Esse algoritmo é apresentado por Yalla [16] e sua descrição resumida é apresentada a seguir com enfoque nos recursos que o mesmo oferece. O algoritmo é constituído pelas seguintes funções ANSI:

- sub/sobretensão ( 27/59 );
- sub/sobrefrequência absoluta ( 81 ) sem taxa (  $\partial f/\partial t$  ) ;
- sobrecorrente ( 51 ) e sobrecorrente com restrição de tensão ( 51-V );
- reversão de potência ( 32 ); e
- sequência negativa ( 46 ).

Pode-se considerar, nesse caso, que as funções 51/51-V, 32 e 46, são basicamente um esquema de proteção de retaguarda dos geradores, não se aplicando nenhum conceito efetivo no que concerne à barra de interligação entre os dois sistemas.

Esse algoritmo baseia-se na utilização da DFT, que tem dois objetivos principais:

- Filtrar a componente DC e as harmônicas sobre a componente fundamental.
- Estimar o fasor correspondente à componente fundamental.

Uma análise mais apurada do algoritmo proposto mostra que algumas funções da proteção podem ser usadas como retaguarda da interligação, mas com um elevado custo operacional devido ao ajuste de tempo relativamente alto necessário para a coordenação com as proteções primárias do gerador.

### 3.3 - Algoritmo de Redfern / Usta

O algoritmo apresentado por Redfern [17,21] tem como principal característica a medição da taxa de variação de potência ativa ( $\partial p/\partial t$ ) nos terminais do gerador. Cabe ressaltar que o algoritmo tem por objetivo principal detectar a perda da geração da concessionária, com conseqüente sobrecarga no gerador da indústria, formando, assim, um sistema ilhado com algumas cargas da concessionária alimentadas por esse gerador.

Procura-se, portanto, não só evitar essa sobrecarga, mas também o religamento entre os dois sistemas em condições fora de sincronismo, para tal, separa-se os dois sistemas antes que o religamento ocorra.

Inicialmente em [17] definem-se os princípios de medição do evento de duas formas distintas:

- **Método Ativo :**

Esse método consta basicamente de “amarrar”o respectivo fluxo entre os dois sistemas, interagindo com a excitação dos geradores na indústria, e esse procedimento só será possível, se a concessionária estiver presente, caso contrário, haverá um aumento do respectivo fluxo ( caso fique alguma carga da concessionária pendurada no gerador da indústria ) e, após um tempo previamente ajustado ( em média de 2 a 5s ), haveria desconexão do gerador.

Outra aplicação interessante seria o fato de esse procedimento também tornar-se válido, mesmo que não haja fluxo de potência ativa entre os dois sistemas. Geralmente, essa proposta pode ser usada como retaguarda dos demais sistemas apresentados, por ser em geral bem mais lenta do que os mesmos.

● **Método Passivo :**

Como técnicas passivas, apresentam-se a medição de taxa de variação de frequência ( $\partial f/\partial t$ ) e Salto de Vetor ( VS ) já citados no ítem 3.1. O princípio básico do algoritmo de Redfern e Usta pode ser visto também como uma técnica passiva que calcula a potência nos terminais do gerador e sua taxa de variação ( $\partial p/\partial t$ ).

Esse valor pode ser melhor entendido usando-se a equação 8 obtida de [21] ;

$$\Delta P_g = \Delta P_s \cdot \frac{H_g \cdot G_g}{\left( (H_g \cdot G_g) + (H_m \cdot G_m) \right)} \quad (08)$$

Onde :

$\Delta P_g$  e  $\Delta P_s$  = variação de carga no gerador e na interligação.

$H_g$  e  $H_m$  = constante de inércia do gerador e da geração da concessionária.

$G_g$  e  $G_m$  = capacidade ( potência ) nominal do gerador da indústria e da concessionária.

Em condições normais, a capacidade ou a potência nominal de geração da concessionária é bem maior do que a da indústria, fazendo com que  $\Delta P_g$  seja pequena, se comparada com  $\Delta P_s$ .

Entretanto, quando ocorre o ilhamento ou seja a perda da geração da concessionária, a variação de carga na rede  $\Delta P_s$  passa a ter efeito direto na saída do gerador  $\Delta P_g$ , de tal forma que  $\Delta P_g = \Delta P_s$ . Nas referências citadas, pode-se encontrar as deduções das equações do algoritmo em pauta.

Contudo, fica claro que o mesmo apresenta a mesma limitação do algoritmo SEG apresentado no item 3.1, ou seja, depende literalmente do fluxo de potência ativa, não nulo, intercambiado entre os dois sistemas, para poder medir a taxa de variação de potência nos terminais do gerador.

### **3.3 - Comentários sobre o Estado da Arte**

A partir do exposto neste capítulo, pode-se concluir que não existe uma proteção efetiva que cubra todos os fenômenos sistêmicos definidos ( curto - circuito, oscilação de potência eilhamento ) de uma forma satisfatória. De fato, essa proteção deve ser rápida o suficiente para atuar antes do tempo morto do religamento da concessionária, e ser bastante criteriosa em sua tomada de decisão.

Dessa forma, o algoritmo proposto neste trabalho, denominado COGERA, propõe-se , por meio de técnicas e conceitos de classificação, usando a transformada Wavelets, primeiramente a identificar qual o tipo de ocorrência no sistema e, em seguida, determinar a necessidade ou não de separação entre a concessionária e a indústria. Esse procedimento é mostrado no capítulo 4.

Em seguida, definido qual o evento que ocorreu, usam-se algoritmos específicos para a localização em caso de defeito ou curto - circuito ( se na concessionária ou na indústria ) , perda ou não da estabilidade entre os dois sistemas no caso de oscilação eletromecânica e o tratamento da condição de ilhamento. Esses algoritmos são desenvolvidos e mostrados respectivamente no capítulo 5.