

Estudo de Operação Ilhada de uma PCH com Checagem de Sincronismo Remoto através da Técnica de PLL

Operation Study of a SHPC with Remote Synchronism Check through the PLL Technique

DOI:10.34117/bjdv7n1-124

Recebimento dos originais: 05/12/2020

Aceitação para publicação: 08/01/2021

Joelson Lopes da Paixão

Mestre em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Endereço: Rua Cinco de Março, 366, Apto 101 – Bairro Camobi – Santa Maria - RS

E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

José Oizimas Junior

Engenheiro Eletricista

Departamento Municipal de Energia de Ijuí - DEMEI

Endereço: Rua 13 de maio, 1037 AP 507 - Bairro Centro – Ijuí - RS

E-mail: oizimas@gmail.com

Mauro Fonseca Rodrigues

Doutor em Engenharia Elétrica

Unipampa - Campus Alegrete

Endereço: Av. Tiarajú, 810 - Bairro Ibirapuitã – Alegrete - RS

E-mail: mauro.rodrigues@gmail.com

RESUMO

Os recursos de microgeração e minigeração de energia elétrica, sobretudo após a promulgação da Resolução 687/2015, vêm aumentando e podendo se tornar uma parte significativa do SEP brasileiro. Nesse contexto, esse artigo estuda a possibilidade de operar uma pequena central hidrelétrica, classificada como geração distribuída (GD), em ilhamento intencional para um determinado volume de carga, analisando suas características de estabilidade e funcionamento. Para isso, foram levantadas suas características de controle de velocidade e tensão para criar um modelo em ambiente computacional, Simulink do Matlab, de forma a poder implementar um sistema de monitoramento de sincronismo através do método PLL – Phase Locked Loop – que garanta o sincronismo correto na volta da ilha ao sistema principal de energia elétrica. Resumidamente, foram criados modelos computacionais para o sincronismo, para a GD e os blocos de carga, determinando as características de sincronismo e estabilidade do sistema de forma a monitorar o funcionamento deste ilhamento e criando condições que determinassem o tamanho desta área a ser atendida, com os blocos de carga definidos. Assim, será possível determinar o tamanho do ilhamento, simuladamente, para uma posterior implementação com religadores automáticos que permitam o controle remoto e automático em caso de parada e/ou retorno do sistema de sincronismo principal, no caso o SEP – Sistema Elétrico de Potência.

Palavras-chave: Operação ilhada, Fontes renováveis de energia, geração distribuída, Método PLL, Simulações de sincronismo, Transformadas de Clarke e Park.

ABSTRACT

The resources of microgeneration and minigeneration of electric energy, especially after the promulgation of the Resolution 687/2015, have been increasing and may become a significant part of the Brazilian SEP. In this context, this article studies the possibility of operating a small hydroelectric plant, classified as distributed generation (GD), in intentional isolation for a determined volume of load, analyzing its stability and functioning characteristics. For this purpose, its speed and voltage control characteristics were raised to create a model in a computational environment, Matlab's Simulink, in order to be able to implement a synchronism monitoring system through the PLL method - Phase Locked Loop - that guarantees the correct synchronism around the island to the main electric power system. Briefly, computational models were created for the synchronism, for the GD and the load blocks, determining the synchronism characteristics and stability of the system in order to monitor the functioning of this island and creating conditions that would determine the size of this area to be served, with the load blocks defined. Thus, it will be possible to determine the size of the loop simultaneously for subsequent implementation with automatic reclosers that allow remote and automatic control in the event of a stop and/or return of the main synchronism system, in the case of the SEP - Power Electrical System.

Keywords: Isolated operation, Renewable energy sources, Distributed generation, PLL method, Synchronism simulations, Clarke and Park transforms.

1 INTRODUÇÃO

Obter energia renovável de pequenos aproveitamentos na forma de microgeração ou minigeração é uma realidade crescente no cenário mundial, devido à necessidade de disponibilidade da eletricidade de forma ininterrupta e estável. No entanto, a maioria das fontes utilizadas opera sincronizada pela rede elétrica existente, ou seja, quando há parada nesta a pequena geradora também para de fornecer energia, embora permaneça com condições para alimentar cargas.

Referente as paradas de fornecimento, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) está exposto a inúmeras perturbações de natureza técnica ou natural. Assim, existem inúmeros eventos, tais como curto-circuito trifásico, saída ou entrada de grandes blocos de cargas, que motivam perturbações no SEP, contribuindo na estatística de causadores do seccionamento no fornecimento de energia. Com isso, paralisando um grande conjunto de consumidores.

Para compor uma nova realidade, com a Geração Distribuída (GD), a partir de pequenas fontes, o estudo objetiva analisar o comportamento de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) operando através do ilhamento intencional.

Ao analisar esse ilhamento intencional, como evento que poderá ocorrer em perda da rede elétrica principal, é necessário determinar a capacidade desta PCH permanecer disponível e fornecer energia elétrica aos consumidores atendidos pela concessionária, podendo realizar o fornecimento isoladamente. Determinando, assim, o volume de cargas que essa operação ilhada é capaz de atender.

Essa simulação faz-se necessária para que seja possível delimitar a carga a ser suprida pelo ilhamento, que possa vir a ocorrer e definir, através do histórico de geração da PCH dos últimos dez anos predecessores, qual a garantia de disponibilidade da geração para operação crítica, atribuída à geração mínima da PCH e demanda máxima da ilha formada para sua atuação.

Como parâmetros de monitoramento, foram tomadas, como condição operacional da ilha, os níveis de tensão e frequência estipulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para verificar o comportamento destas características adotadas, para a operação no ilhamento, foi adotado o ambiente computacional de simulação do software Matlab®, permitindo analisar a variação de tensão e frequência do sistema ilhado para faltas severas e variação ou saída de grandes blocos de carga.

O estudo utiliza os conceitos de análise de estabilidade e perda de sincronismo aplicado ao SEP para definir o limite máximo de estabilidade do gerador e, a partir destes dados, ajustar a curva de atuação dos equipamentos de proteção utilizados na ilha de forma a atuarem em tempo inferior ao tempo de instabilidade. Porém, a atuação do equipamento de proteção fará com que seja retirada parcela de carga da ilha, fato, este, que também causa alteração no comportamento de estabilidade, tornando necessária a simulação do tempo de resposta dos controladores de tensão e velocidade até encontrar um novo ponto de operação estável ao comparar com o tempo de ajuste do sistema de proteção.

Outra condição importante em análise neste estudo é o retorno desta ilha ao SEP, quando normalizar o fornecimento de energia principal. Para isso, será realizada aquisição de sinais do monitoramento remoto do sincronismo entre o SEP e a área seccionada para ilha através de sistema instalado junto ao religador automático telecomandado, no limiar de operação das zonas. Assim, no momento em que a energia no alimentador, conectado ao SEP, é restabelecida, é checado e realinhado o sincronismo do ilhamento com o SEP para ser emitido um comando de fechamento do religador. Este acionamento faz com que a ilha passe a integrar novamente o SEP sem a necessidade de

paralisação da geração da PCH e mantendo os clientes da ilha imunes à paralisação ocorrida no alimentador principal [1].

Para que esse processo se complete corretamente o sincronismo da PCH com o sistema é baseado no conceito de malha travada em fase ou *Phase Locked Loop* (PLL), pelo qual se trava em fase um sinal externo (neste caso, a PCH) com um sinal de referência (neste caso, o restante do sistema - SEP). As transformadas de Clarke e Park, de ambos os sistemas, permitem transformá-los de sistemas trifásicos em sistemas bifásicos, com 90° de defasagem entre as fases. A sincronização ocorrerá quando o ângulo entre as tensões de eixo direto (obtidas pela transformada de Park) do SEP e da PCH tenderem a zero. Neste momento, a projeção da tensão de quadratura da PCH sobre a tensão de quadratura do SEP será zero e os sistemas estarão em fase, permitindo a conexão entre ambos.

2 ANÁLISE DA FREQUÊNCIA PARA OPERAÇÃO EM MODO ILHADO INTENCIONAL

As fontes geradoras de energia elétrica com capacidade instalada inferior a 30 MW são classificadas como Geração Distribuída (GD). Este segmento da geração proporciona inúmeros benefícios ao sistema elétrico, entre as quais se destacam: aumento da eficiência energética e redução simultânea dos custos das energias elétricas [2]. A GD se caracteriza pelo atendimento a cargas locais, sem a necessidade de utilização de linhas de transmissão [3]. De modo geral, a GD está conectada diretamente aos sistemas de distribuição, segmento que apresenta menor confiabilidade se comparado aos sistemas de transmissão [4].

A maioria absoluta das redes elétricas de distribuição utiliza a topologia radial, sem redundância de linhas e equipamentos. Tais características tornam o sistema de distribuição mais vulnerável a falhas. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo analisar a possibilidade de operação no modo ilhado intencional, como forma de melhorar os índices de confiabilidade ao sistema de distribuição e maximizar os benefícios da GD. O enfoque maior é dado à análise de proteção do sistema, do ponto de vista da coordenação, seletividade e da estabilidade transitória [5].

O sistema de distribuição de energia elétrica adotado pelas concessionárias é constituído basicamente na configuração radial sem redundância. Este método consiste na derivação de ramais do tronco principal para atender blocos de carga decorrentes. O

sistema de proteção é instalado na proximidade de derivação do alimentador, atuando sempre que ocorrer alguma perturbação no ramal [6].

No momento em que o sistema de proteção seccionar a parcela defeituosa ocorre desacoplamento do bloco de carga da ilha, produzindo variações de tensão e frequência. Desta forma é necessário analisar o tempo de resposta dos controladores de velocidade e tensão quando ocorrer a saída de blocos de carga da ilha para não violar os parâmetros determinado pelo Módulo 8 do Prodist – Qualidade de Energia Elétrica [7].

2.1 ANÁLISE DA FREQUÊNCIA PARA OPERAÇÃO EM MODO ILHADO INTENCIONAL

Para que a ilha possa operar isolada do sistema, devem-se atender as determinações exigidas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). De acordo com o Módulo 8, a frequência da ilha deve satisfazer as mesmas condições do Sistema Interligado Nacional (SIN), representada na Tabela 1.

Tabela 1: Faixa de frequência operacional.

Frequência (Hz)	Tempo (s)
$F > 62$	30
$58,5 > F > 63,5$	10
$F < 57,5$	5

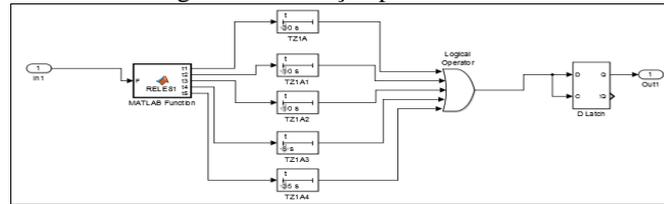
Fonte: ANEEL, 2014

Em regime de operação normal do sistema após distúrbio ocorrido na ilha, a frequência deve retornar a faixa de (59,5 a 60,5) Hz no período máximo de 30 segundos. Quanto a valores superiores a 66 Hz ou inferior a 56,5 Hz o sistema de proteção deve atuar instantaneamente.

2.1.1 Ajuste do Relé de Frequência 81

Para este estudo foi implementado o ajuste do relé de frequência 81 no Simulink, Figura 1. A lógica de implementação consiste em realizar uma análise comparativa da frequência do sistema com o valor fundamental. A parametrização da curva de atuação é de tempo definido, atendendo o determinado na Tabela 1. Toda vez que ocorrer variação na frequência da ilha, e esta violar o que determina o Módulo 8 do Prodist, o relé 81 atribui nível lógico alto a saída de *trip*.

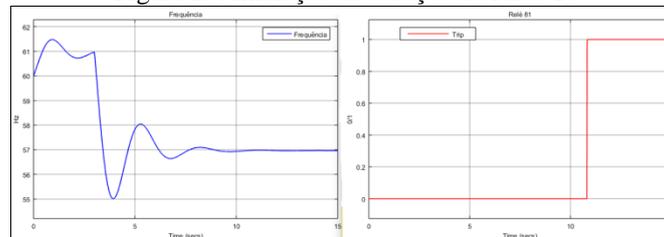
Figura 1: Simulação para o relé 81.



Fonte: Autoria Própria.

Para validar o ajuste do relé 81 foram realizados testes de entrada de carga que ultrapassam a capacidade do controlador de velocidade estabilizar a frequência dentro dos parâmetros exigidos. A Figura 2 representa o comportamento da frequência após a entrada de carga, constatando a acomodação da frequência após o período transitório em 57 Hz. Para este valor de frequência, o ONS permite tempo máximo de permanência de 5 segundos, evidenciado pelo *trip* de atuação do relé 81.

Figura 2: Simulação da atuação do relé 81.



Fonte: Autoria Própria.

2.2 ANÁLISE DE TENSÃO EM MODO DE OPERAÇÃO ILHADO INTENCIONAL

A tensão é um parâmetro fundamental para análise do modo de operação ilhado intencional de um sistema. Segundo o Módulo 8 do Prodist, os valores em regime permanente não devem ser inferiores a 95% (noventa e cinco por cento) e nem superiores a 105% (cento e cinco por cento) do valor nominal de tensão no ponto de conexão.

2.2.1 Ajuste do Relé de Subtensão e Sobretensão

Os ajustes do relé de Subtensão (27) e Sobretensão (59), implementados no simulink, possuem curvas de atuação de tempo definido. Os parâmetros de ajuste utilizados correspondem aos recomendados pela Std1547 da IEEE, como ilustrado na Tabela 2 [6].

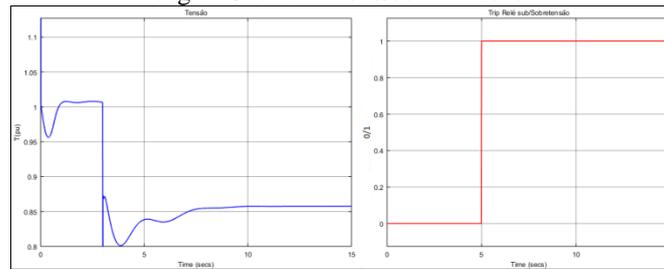
Tabela 2: Faixas de tensão.

Tensão (V)	Tempo (s)
$V > 50$	0,16
$50 \leq V < 88$	2,00
$110 < V < 120$	1,00
$V \geq 120$	0,16

Fonte: IEEE 1547, 2003

Objetivando validar a implementação do sistema de proteção contra sub/sobretensão, foram realizadas simulações para que os níveis de tensão excursionem nas faixas de ajuste do relé. A Figura 3 comprova o funcionamento adequado do sistema de proteção implementado. Após a entrada de carga ocorre um afundamento de tensão, ultrapassando os valores determinados por norma, fazendo com que o relé produza o *trip* de abertura do disjuntor.

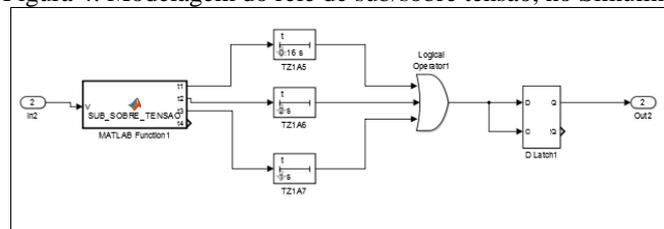
Figura 3: Relé de sub/sobre tensão.



Fonte: Autoria Própria.

A arquitetura da composição do relé de sub/sobre tensão é representada pela Figura 4.

Figura 4: Modelagem do relé de sub/sobre tensão, no Simulink.



Fonte: Autoria Própria.

3 SISTEMA DE PROTEÇÃO DOS BLOCOS DE CARGA

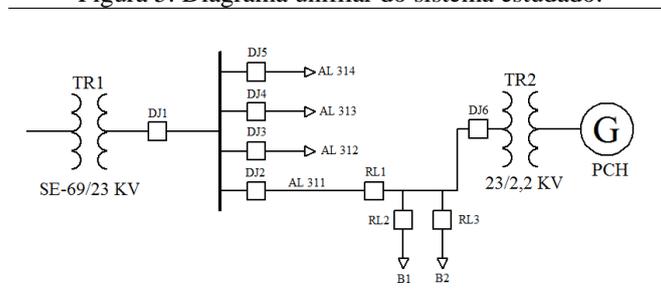
O ajuste dos religadores automáticos utilizados na proteção dos blocos de carga deve satisfazer os menores níveis de corrente de curto-circuito e correntes de sobrecarga, além de atuar em tempo inferior ao de estabilidade crítica dos geradores quando a rede for submetida a perturbações.

O sistema utilizado para definir os níveis de corrente de curto circuito no sistema de distribuição é baseado no método de componentes simétricas [8]. Para determinação do tempo de ajuste da proteção dos blocos de carga, foram realizadas simulações com diferentes períodos de exposição à falta e analisado o comportamento da GD. Esta análise visa definir o quão rápido o sistema de proteção deve atuar para os menores níveis de correntes de surtos a fim de que o gerador não perca o sincronismo.

A perda de sincronismo de geradores é provocada, na grande maioria dos casos, por falhas nas redes que interligam a geração ao sistema. Considerando que, no momento da falta, os geradores não alteram significativamente as características de produção nominal em virtude da inércia do sistema de regulação, é possível manter o sincronismo dos geradores através de sistema de proteção ajustado a atuar em tempo inferior ao de instabilidade da máquina.

O diagrama unifilar do sistema estudado é apresentado pela Figura 5. A GD é conectada ao alimentador 311 (AL 311), e o religador RL1 está instalado no limiar de operação. Em operação normal do sistema o RL1 opera normalmente fechado, ocorrendo a paralização do AL, o religador é seccionado, formando o ilhamento intencional, e a GD passa a atender os blocos de carga B1 e B2.

Figura 5: Diagrama unifilar do sistema estudado.



Fonte: Autoria Própria.

Onde:

TR1: Transformador rebaixador 25 MVA;

TR2: Transformador elevador 4MVA;

DJ1, DJ2.....DJ6: Disjuntor a vácuo;

RL1, RL2 e RL3: Religador automático;

AL311.....AL314: Alimentador;

G: Gerador equivalente 4MVA;

B1: Bloco de carga 1.8 MVA;

B2: Bloco de carga 0.8 MVA.

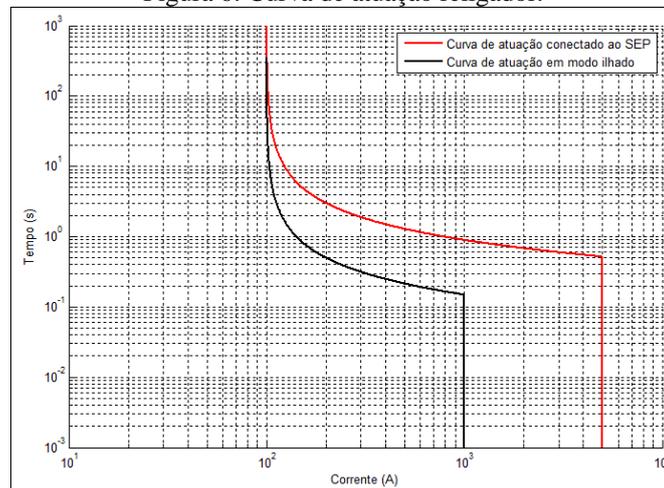
3.1 PROTEÇÃO DO BLOCO B1 E B2 DE CARGA

O sistema de proteção dos blocos de carga B1 e B2 requer análise distinta para os níveis de curto-circuito (CC) em operação no modo ilhado intencional ou interligado ao SEP. Tendo em vista, que para operação interligado ao sistema os níveis de CC possuem

magnitude superior ao modo isolado, é necessário aplicar ajuste da curva de atuação dos religadores de proteção de acordo com o modo de operação.

A Figura 6 representa o ajuste da curva de atuação do religador para operação conectada ao sistema ou em modo ilhado.

Figura 6: Curva de atuação religador.



Fonte: Autoria Própria.

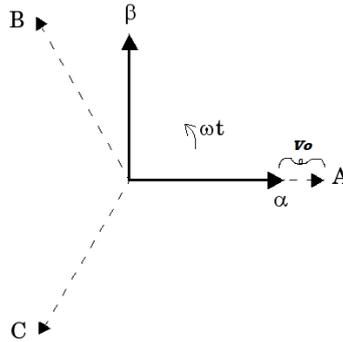
4 CHECAGEM DE SINCRONISMO ATRAVÉS DA TÉCNICA PLL

O conhecimento e uso das transformadas de Clarke e Park são necessários para a aplicação da técnica de PLL. Estas transformadas permitem a conversão de um sistema trifásico, desequilibrado ou não, em um sistema bifásico, facilitando a aplicação das técnicas de sincronismo de fase.

4.1 TRANSFORMADA DE CLARKE

A transformada de Clarke consiste na transformação de um sistema trifásico, girante no tempo, abc , em um sistema bifásico, estacionário, $\alpha\beta$. Ainda se houver desbalanço nas fases, deve-se usar o V_0 para a fase a . A coordenada α é geralmente travada para a fase a , enquanto que a coordenada β é defasada de 90° em relação a coordenada α . Assim, na transformação os eixos abc são transformados em eixos $\alpha\beta$, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7: Transformada de Clarke [9] [10].



Na formulação das equações de transformação, considera-se que: $V_a = V_m \sin(\omega t)$; $V_b = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$; $V_c = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3)$; $V_m = \sqrt{2/3} V_{line}$; $V_{line} = \sqrt{3} V_a$ e $V_a = V_m/\sqrt{2}$. Observando a Figura 1, podem-se formular as seguintes equações:

$$V_a = V_\alpha + V_o \quad (1)$$

$$V_b = -V_\alpha \cos 60^\circ + V_\beta \cos 30^\circ + V_o \quad (2)$$

$$V_c = -V_\alpha \cos 60^\circ - V_\beta \cos 30^\circ + V_o \quad (3)$$

$$V_a + V_b + V_c = 3V_o \quad (4)$$

Ou então, reescrevendo as equações (1, 2, 3 e 4) na forma matricial, chega-se a:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

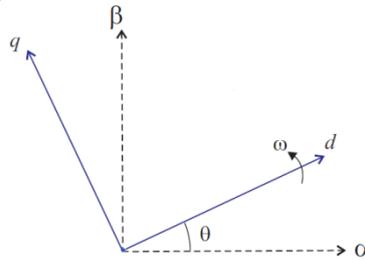
Fazendo a inversa da matriz (5), obtém-se a matriz (6):

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} V_m \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

4.2 TRANSFORMADA DE PARK

A transformada de Park ou de Blondel corresponde na transformação de um sistema trifásico abc , em dois eixos rotativos dq (direto e em quadratura). De modo que, a coordenada d gira por um ângulo θ , em relação a uma das fases do sistema abc que, em geral, é a fase a . A coordenada q é defasada de 90° em relação a coordenada d . Na Figura 8, são mostrado os eixos dq e $\alpha\beta$ no mesmo plano.

Figura 8: Transformada de Park [9] [10].



Na forma matricial, pode-se relacionar a Transformada de Clarke com a de Park da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fazendo a inversa da matriz (7), obtém-se a matriz (8):

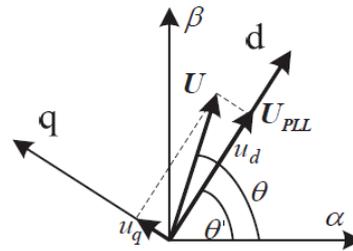
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} \quad (8)$$

4.3 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO PLL

Existem vários tipos de PLL, de acordo com a forma de implementação, pode ser dividido em *hardware* PLL e *software* PLL. Por aplicações pode ser dividido em PLL trifásico e PLL monofásico. E quanto à estrutura de controle pode ser classificado em PLL de malha aberta e PLL de malha fechada [11].

Em teoria, o algoritmo PLL proporciona o travamento de um sinal externo (U), em fase, com um sinal de referência (U_{PLL}). A ideia para sincronizar o sinal externo (correspondente a uma GD) com o sinal de referência (correspondente à rede elétrica) é de que quando ambos os sinais estiverem em fase, ou então, com uma pequena diferença angular entre eles, o vetor girante da GD (U) se projete sobre o vetor da rede (U_{PLL}). Através da Transformada de Park, obtém-se as tensões de eixo direto e em quadratura de ambos os sinais. Para que estes sinais estejam em fase e, conseqüentemente, sincronizados, a diferença entre os ângulos do PLL e do sinal externo deve ser zero. Isto é, $\theta \approx \theta'$. Quando isto ocorre, a projeção da tensão de quadratura do sinal externo tende a zero, e a tensão de eixo direto do U_{PLL} (rede) e do sinal externo (GD) são iguais [11]. A representação gráfica deste processo é explicitada na Figura 9.

Figura 9: Diagrama do princípio de operação do PLL [11].



Na forma de equações, o processo de sincronização pode expresso como segue. Adotando $\phi = \theta - \theta'$, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \\ \Delta V_o \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta') \\ \sin(\theta - \theta') \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

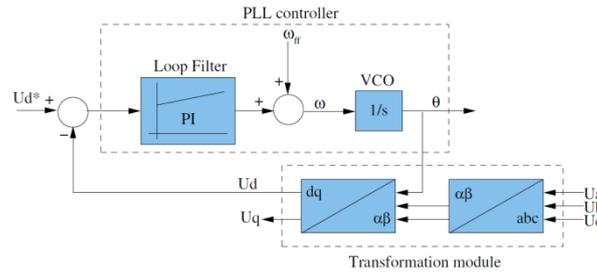
Quando a diferença entre o ângulo do PLL e da GD (ϕ) é pequena ou próxima de zero, tem-se que $\sin(\theta - \theta') \approx (\theta - \theta')$, sendo os ângulos expressos em radianos. Portanto, pode-se afirmar que, para um sistema trifásico equilibrado, quando o PLL está travado/sincronizado a componente de eixo em quadratura se reduz a zero ($\sin(0) = 0$); e a componente do eixo direto vai a um ($\cos(0) = 1$). Enquanto os sistemas não estão sincronizados ou há uma pequena defasagem, a componente de eixo em quadratura da GD é linearmente proporcional ao erro (diferença de fases) [11]. De modo que:

$$\Delta V_q = \sqrt{2/3} V_{line} (\theta - \theta') = V_m (\theta - \theta').$$

4.4 PROPOSTA DE TOPOLOGIA PLL PARA A SINCRONIZAÇÃO

O objetivo do controle do PLL é fazer com que as tensões da rede e da GD entrem em fase, para que os sistemas possam então ser interconectados. A topologia de controle escolhida, e que deve ser aplicada no algoritmo PLL, visa anular a diferença entre as tensões de eixo direto da rede (U_d^*) e da GD (U_d) [12]. Na Figura 10 é apresentada a estrutura de controle proposta.

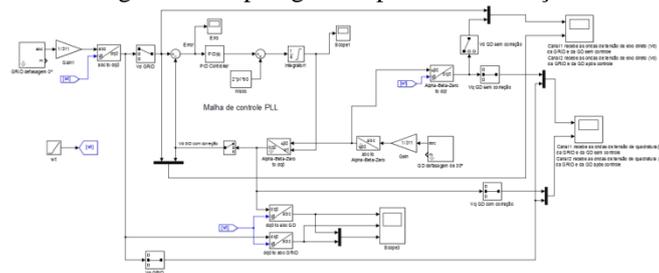
Figura 10: Topologia do algoritmo de controle do PLL [12].



Para realizar o sincronismo de uma Geração Distribuída (GD) [13], nesse caso específico hidráulica com acoplamento ótico, a topologia foi simulada no ambiente Matlab de forma a criar uma estrutura capaz de antecipar possíveis problemas de implementação e permitir, posteriormente, a intervenção prática em caso real sob estudo.

A Figura 11 apresenta a topologia criada no ambiente de simulação computacional. Nessa estrutura inicialmente é feita a captação da tensão da fonte da rede, bloco GRID defasagem 0°, aplicadas as transformadas anteriormente apresentadas e inserido o sinal resultante num controlador PID que realizará o realinhamento, pois sua outra entrada está recebendo o sinal oriundo da fonte GD, chamada de GD defasagem 30°, no bloco correspondente. Em ambos os casos, o sinal resultante refere-se às tensões de eixo direto (Vd) que devem estar casadas, para efetivar o sincronismo. As Figura 12 e figura 13 apresentam estas etapas do sistema. A constante proporcional (P) foi configurada em 180, a integral em 3200 e a derivativa em 1, conforme indicação de [10].

Figura 11: Topologia completa de simulação.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 12: Sistema de correção com controlador PID.

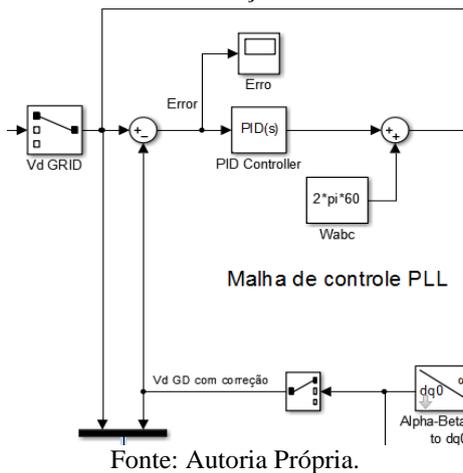
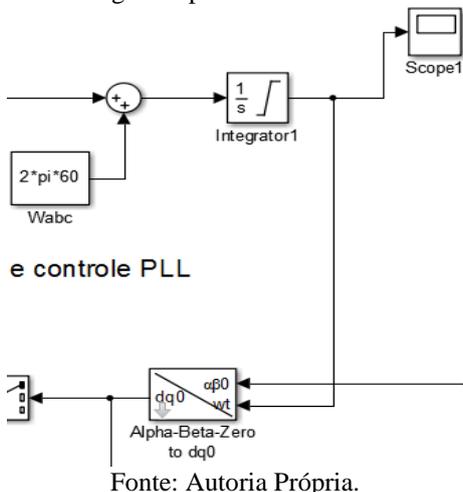


Figura 13: Integrador para sincronismo GD – GRID.

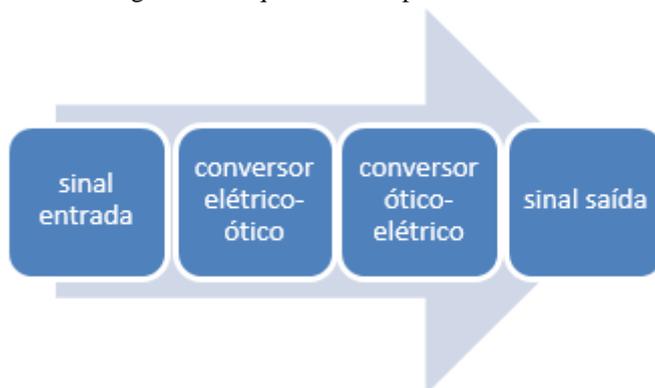


Posteriormente, um integrador faz a junção dos sinais e realimenta o sistema de sinal da GD para inserir a correção e criar o sincronismo entre as duas fontes, figura 13. Este integrador possui uma referência circular $2\pi f$, para fonte senoidal de sinal que o prende aos 60 Hz da rede, de forma a manter o sistema sem desvios de frequência.

4.4.1 Acoplamento

Os sinais de tensão tanto da rede como da GD dependem de certa instrumentação para serem adquiridos e entrar no algoritmo de controle PLL. Tal aquisição pode ser feita com o uso de acopladores óticos.

Figura 14: Esquema do acoplamento ótico



Fonte: Autoria Própria.

O acoplamento ótico dos sinais torna capaz de omitir da simulação sua existência. Esse fator ocorre devido ao isolamento elétrico entre as partes de entrada e saída. Há apenas um sinal ótico entre um par de acoplamento, onde um sinal é reduzido até uma amplitude que o sistema de conversão possa transformar o sinal elétrico em luz, que será percebida pela saída e novamente convertida em eletricidade, figura 14 [14].

Ainda, para esta aquisição de sinais, também poderia ser utilizado o amplificador com isolamento ótico, o qual é mostrado na Figura 16.

Figura 15: Diagrama de um acoplamento ótico [14].

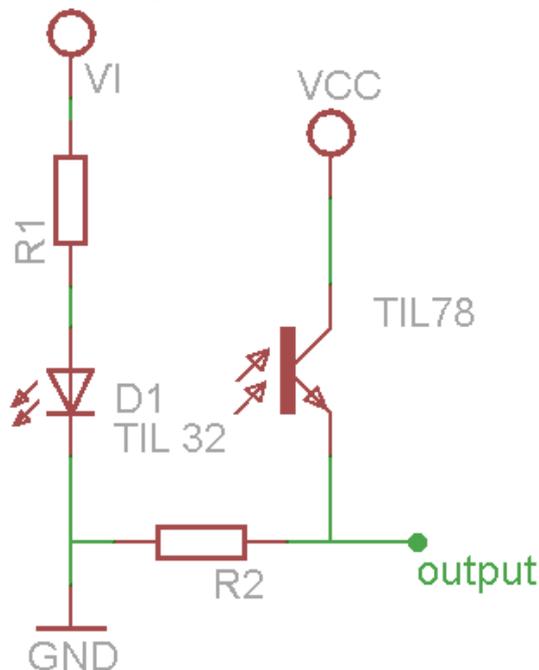
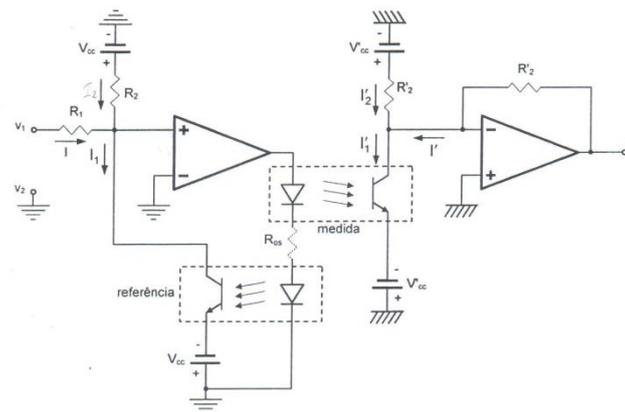


Figura 16: Circuito amplificador com isolamento ótico [15].



Para efetuar esse acoplamento pode ser utilizado um sistema rebaixador de sinal de forma a atribuir uma atenuação e colocar o sinal a ser analisado dentro de uma faixa especificada pela tensão de alimentação a ser utilizada no conversor. Normalmente, um sistema com divisor de tensão e filtros gera um sinal de saída convertido dos 311 Vp para 5 Vp. Na Figura 15 apresentou-se uma topologia básica desse tipo de acoplamento com o par ótico emissor e receptor, formados, neste caso, por um TIL32 e um TIL78. Assim, o sinal elétrico emitido pelo TIL32 é convertido em luz que é captada pela base do transistor TIL78, como se fosse a corrente de base de um TBJ, e convertido novamente em eletricidade no coletor ou emissor deste. Observação: existem Circuitos Integrados (CIs) dedicados a esta aplicação no mercado, como, por exemplo, o CI 4N25.

A topologia de captura de sinal permite, na Figura 15, aproveitar a queda de tensão sobre o resistor R2, a partir da condutividade apresentada pelo TIL78 de acordo com o sinal luminoso recebido em sua base semicondutora. Com a saída no emissor não há inversão de fase, enquanto que no coletor haveria uma defasagem de 180° no sinal.

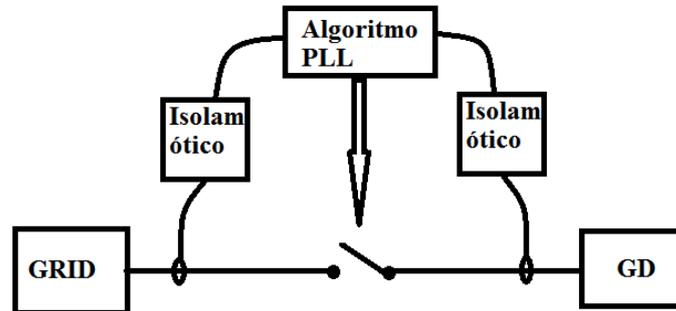
4.4.2 GD com Fonte Hidráulica

A fonte hidráulica apresenta uma grande inserção na matriz de energia elétrica brasileira. Os pequenos aproveitamentos dessa energia significam, em sua maior parte, pequenos problemas ambientais e baixa ocupação de área para alagamento. Assim, é importante que ela seja corretamente sincronizada com a rede devido, principalmente, aos seus geradores serem em corrente alternada e dependerem do sincronismo para manter a estabilidade do sistema.

O algoritmo PLL pode ser implementado em um microcontrolador do tipo PIC, DSP, ARM, etc. Sendo que os sinais de tensão são lidos no microcontrolador após passarem pelo circuito de isolamento. No microcontrolador é implementado o algoritmo

PLL, responsável pela sincronização. A ilustração esquemática do processo de sincronismo pode ser vista na Figura 17.

Figura 17: Esquema do processo de sincronismo entre a rede e a GD.



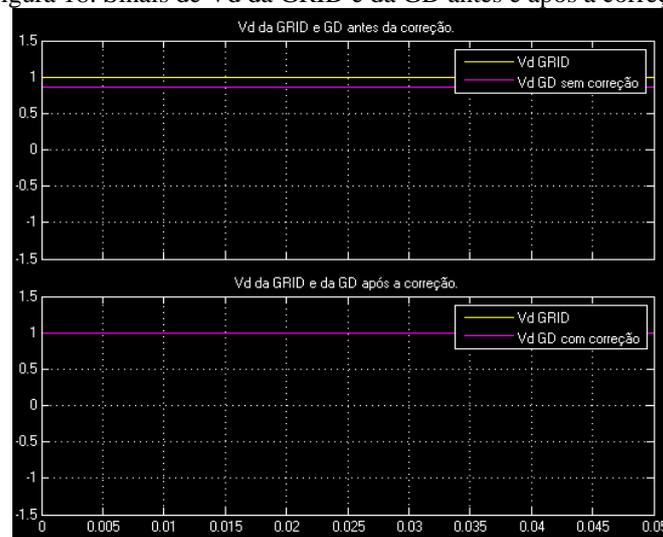
Fonte: Autoria Própria.

Quando o algoritmo PLL fizer o travamento em fase das tensões da rede e da GD, as duas fontes podem ser interligadas. Dessa forma, a aplicação do PLL para sincronizar rede e gerador deve estar associada aos controladores locais da GD de forma a criar um ambiente totalmente controlado.

4.5 RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO SINCRONISMO – PLL

Ao efetuar as simulações obteve-se o resultado apresentado na Figura 18. Percebe-se que a defasagem previamente definida está presente em 30° . Após passar pelo sistema proposto PLL a defasagem é totalmente eliminada. Fazendo com que as tensões de eixo direto do tanto da GRID como da GD sejam iguais a 1, em valor por unidade (pu). Convém ressaltar que defasagens maiores ou menores obtiveram o mesmo resultado de saída.

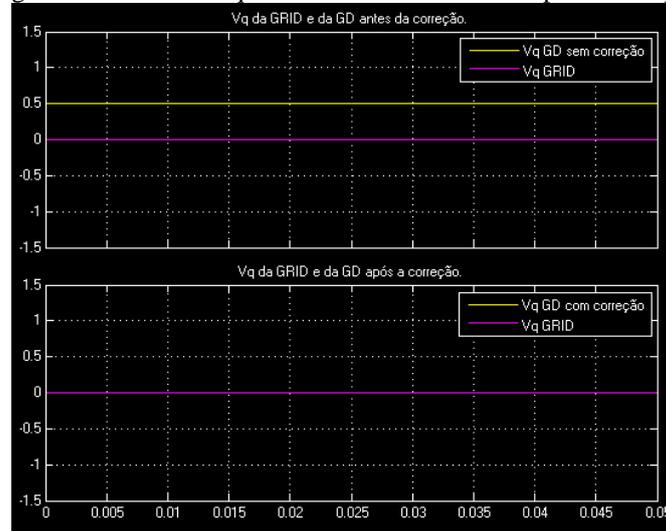
Figura 18: Sinais de Vd da GRID e da GD antes e após a correção.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a teoria apresentada no item C, da Seção IV, quando ambas as fontes estão em fase, a projeção da tensão de quadratura (V_q) da GD sobre a (V_q) da GRID deve ser zero. Isso pode ser observado na Figura 19.

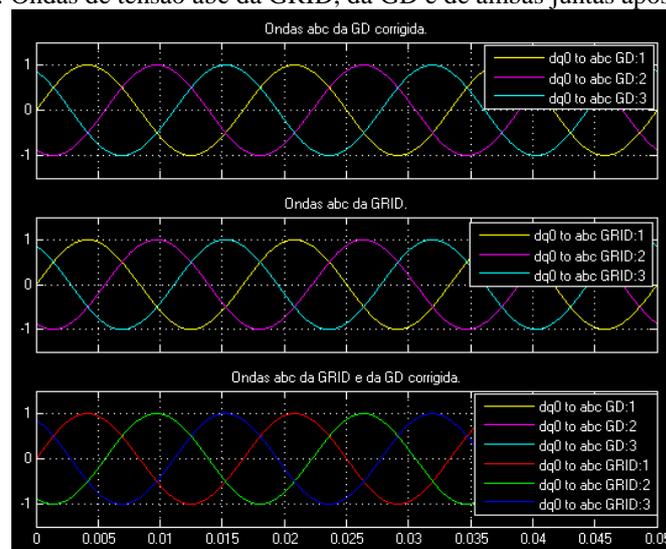
Figura 19: Sinais de V_q da GRID e da GD antes e após a correção



Fonte: Autoria Própria.

Quando a rede e a GD apresentarem tensões de eixo direto igual a um, e as tensões em quadratura forem iguais a zero, significa que as mesmas estão sincronizadas. Esse resultado é mostrado na Figura 20, onde é feita a transformada de Park ($dq0$) para o eixo trifásico (abc), das tensões da GRID, da GD após a correção e da GRID e da GD corrigida juntas.

Figura 20: Ondas de tensão abc da GRID, da GD e de ambas juntas após a correção.



Fonte: Autoria Própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se, através dos experimentos computacionais, que o ajuste dos parâmetros dos equipamentos de proteção elétrica, considerando a estabilidade dos geradores síncronos, produzirá ganhos significativos no aproveitamento da energia elétrica, tornando o estudo de caso promissor para uma implementação real, após planejamento detalhado.

O ganho de aproveitamento é dado ao fato de que haverá possibilidades para dissipação da energia produzida em operação normal e defeituosa do sistema, garantindo a continuidade da produção da Geração Distribuída e aumentando a confiabilidade do sistema.

Além disso, busca-se evitar descumprir cláusulas específicas dos limites de continuidade estipulados no Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) celebrado entre a distribuidora e a geradora, conforme previsto no Módulo 3 do Prodist – Acesso ao Sistema de Distribuição.

Conforme observado nas simulações executadas o controle PLL é efetivo no sincronismo de sistemas trifásicos. Sendo assim, imprescindível para inserção da GD na rede elétrica, principalmente em baixa tensão, pois dispensa sincronismo local podendo escravizar a fonte na rede primária do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Esse fator aumenta a confiabilidade na integração dos sistemas e vem propiciando a inserção de microgeração e minigeração na rede de distribuição de energia [16].

Através do estudo realizado foi possível comprovar a efetividade do controle de travamento de fase através da técnica PLL, em consonância com a aplicação pretendida de uma PCH, GD, operando em ilha para atendimento de parte da carga existente na área de concessão de uma pequena empresa do setor elétrico. A partir dos dados simulados será possível iniciar o planejamento necessário para a implantação real deste sistema na rede da concessionária.

REFERÊNCIAS

- [1] P. KUNDUR, Power System Stability and Control, 1994.
- [2] W. EL-KHATTAM e M. M. SALAMA, “Distributed generation technologies, definitions and benefits,” Electric Power Systems, 2004.
- [3] T. ACKERMANN, G. ANDERSSON e L. SÖDER, “Distributed generation: a definition.,” Electric Power Systems, 2001.
- [4] N. KAGAN, C. C. B. OLIVEIRA e E. J. ROBBA, Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, 2010.
- [5] A. GÓMEZ-EXPÓSITO, A. J. CONEJO e C. CAÑIZARES, Sistemas de Energia Elétrica: Análise e Operação, 2011.
- [6] IEEE, “1547-2003 – IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems,” pp. 1-27.
- [7] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica,” 01 2016. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. [Acesso em Dezembro 2016].
- [8] G. Kindermann, Curto Circuito, 1997.
- [9] I. BARBI, “A Transformação de Park e a Máquina Simétrica,” em Teoria Fundamental do Motor de Indução, Florianópolis/SC, UFSC, 1999, pp. 64 - 85.
- [10] J. P. ARRUDA, Dissertação_Métodos de sincronização de conversores em sistemas de geração distribuída., Recife/PE: UFPE, 2008.
- [11] D. Z. a. P. G. D. Xie, “Research on Phase-Locked Loop Control and Its Application.,” IEEE, pp. 818-821, 2016.
- [12] M. L. P. R. A. Teodorescu, “PLL Algorithm for Power Generation Systems Robust to Grid Voltage Faults.,” IEEE.
- [13] Aneel, “BIG-Banco de Informações de Geração,” ANEEL, 10 2016. [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/big-banco-de-informacoes-de-geracao/655808?inheritRedirect=false. [Acesso em 11 2016].
- [14] L. & B. R. L. NASCHELSKY, Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, São Paulo: Pearson, 2004.
- [15] F. Farret, “Amplificadores para instrumentação,” Santa Maria-RS, 2012, p. 31. Aneel, “ANEEL,” 11 2015. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. [Acesso em 11 2016].
- [16] Aneel, “ANEEL,” 11 2015. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. [Acesso em 11 2016].