

SINCRONISMO EM UM SISTEMA ON GRID DE FONTE HIDRÁULICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE PLL

A. P. Medeiros

Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa
Maria
Santa Maria, Brasil
medeiros.aerton@gmail.com

D.P. Bertineti

Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa
Maria
Santa Maria, Brasil
dbertineti@gmail.com

C.M. Farias

Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa
Maria
Santa Maria, Brasil
Charles.mf@gmail.com

Resumo – O presente artigo tem por proposta desenvolver uma interface de sincronização de uma pequena fonte de geração hidráulica com a rede elétrica. Os sistemas de geração constituídos por uma hidroelétrica despacham a energia elétrica produzida através de sistemas inversores de frequência que estão conectados à rede elétrica de distribuição. A sincronização dos sistemas de micro e minigeração distribuída são realizadas através da utilização de PLL (*Phase-locked loop*). Ao final deste trabalho é apresentado o resultado das simulações realizadas no software MATLAB.

Keywords – Controle Reativo, Micro e Minigeração Distribuída, Sincronismo PLL.

I. INTRODUÇÃO

O Brasil vive um momento destacável na diversificação de sua matriz energética. Com a entrada em vigor da Resolução Normativa 482 da ANEEL, atualizada através da Resolução Normativa 687/2015 da ANEEL, as distribuidoras estão adequando seus sistemas para tratar do acesso de micro e minigeração distribuída que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras [1].

A microgeração distribuída fica caracterizada por ser uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Já a minigeração distribuída é enquadrada como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de

distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras, conforme[2].

Os circuitos de sincronismo estão se tornando cada vez mais importante na operação dos sistemas elétricos e eletrônicos. Tal popularidade se deve ao fato de que esses circuitos geralmente apresentam uma estrutura relativamente simples, além de serem bastante eficientes na rejeição de distúrbios indesejáveis como harmônicos e desequilíbrio de tensão. Em diversos estudos a estrutura de sincronismo utilizada é a PLL (*Phase-locked loop*).

Grande parte dos sistemas de controle conectados à rede elétrica necessita de informações precisas referentes a fase e a frequência do sistema, sendo que a maior parte deles utiliza algum tipo de circuito PLL. As estruturas PLL convencionais surgiram a partir de um modelo analógico clássico de controle por realimentação, composto basicamente por um detector de fase, um filtro passa-baixas e um oscilador controlado por tensão [3] e [4].

PLL são métodos empregados para a geração de um sinal sincronizado com outro sinal utilizado como referência. Bastante usado em sistemas de controle, instrumentação e sincronização; vêm sendo largamente empregados em sistemas de conversores de energia conectados à rede tais como:

- Restauradores de tensão;
- Conversores de interface da rede com fontes de geração distribuída;
- Sistemas de transmissão CA flexíveis;
- Filtros ativos;
- Instrumentos para medições relacionados a qualidade de energia e monitoração de faltas.

Este artigo tem por objetivo verificar o comportamento de uma fonte de geração hidráulica conectada à rede elétrica através de um inversor de frequência utilizando o PLL para garantir o sincronismo da injeção de energia na rede elétrica.

II. PEQUENOS APROVEITAMENTOS ELÉTRICOS

O Brasil é um país de diferenças continentais e a energia elétrica, agregada aos meios de comunicação que na sua maioria são eletrônicos, poderia ser, hoje, a forma de levar progresso e conforto a sua população.

Em [5] os pequenos aproveitamentos elétricos são caracterizados pela utilização de qualquer uma das várias fontes de energia encontradas na natureza, passíveis até mesmo de serem economicamente convertidas em energia elétrica. Dentre tantas formas de aproveitamentos, as pequenas fontes de geração hidráulicas se destacam pelo potencial para produção de energia elétrica em pequenas propriedades rurais, possibilitando a autoprodução de energia hidroelétrica. Esse potencial se deve ao fato que nesse meio passam rios com corredeiras ou quedas de água que podem servir como base primária na geração de energia elétrica.

As centrais hidroelétricas podem ser a fio de água ou com reservatório de acumulação.

Para Felix A. Farret em qualquer caso de projetos de microcentrais hidroelétricas os seguintes dados podem ser de extrema relevância[5]:

- Disponibilidade local dos materiais necessários à construção da barragem, como pedras e madeiras;
- Disponibilidade de mão de obra para a redução de custos;
- Distância entre a rede pública e a central, considerando a interligação futura à rede de distribuição por linha monofásica(MRT), bifásica ou trifásica.

III. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PLL

O PLL, Fig. 1, é um sistema de controle que gera um sinal de saída cuja fase é função da fase de um sinal de entrada. Desta forma, ele é bastante utilizado em sincronização de sinais.

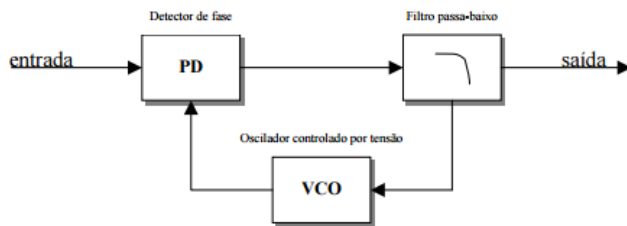


Fig. 1. Diagrama básico de PLL.

A saída do detector de fase é proporcional à diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal realimentado. Se houver uma diferença nas frequências dos dois sinais, o erro de fase será crescente e a saída do detector de fase refletirá isso. Esta saída poderá ser filtrada e aplicada a um oscilador controlado por tensão (VCO), que “ajusta” a frequência de realimentação até esta ser idêntica à frequência de entrada; nestas condições o erro de fase é constante e assim constante também o sinal aplicado ao VCO, o que mantém o

sincronismo das frequências.

As características mais importantes de um PLL são a sua gama de aquisição de frequências na qual o PLL consegue obter o sincronismo e as características da resposta transitória do PLL, ou seja, tempo de estabelecimento e *overshoot*.

Os módulos PLL detectam a amplitude e fase dos sinais de entrada na frequência definida, através de um ganho em malha fechada que tende a zerar a diferença de fase entre o sinal de entrada e a saída do *Voltage Controlled Oscillator*, VCO, na frequência de operação[6]. O módulo PLL, com bloco mostrado na Fig.2, tem a entrada VCO que recebe um conjunto de dados digitalizados a uma taxa de 30 kbps, onde os dados podem ser referentes a tensões ou correntes, enquanto que a entrada v_{in} indica a frequência de operação do bloco, que permite monitorar a frequência fundamental da rede ou qualquer de suas harmônicas.

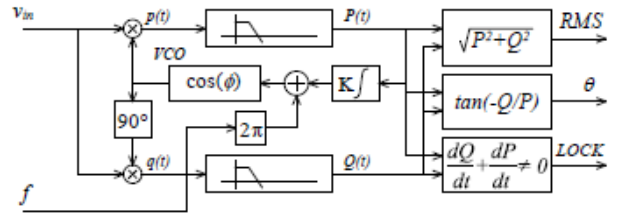


Fig. 2. Diagrama de Bloco do Módulo PLL.

Os módulos PLL são compostos por dois multiplicadores de tensão, responsáveis pela geração dos sinais em fase e em quadratura, que são filtrados para excluir a oscilação. O sinal em fase filtrado – $P(t)$ – representa a correlação entre a entrada e o VCO, enquanto que o sinal em quadratura – $Q(t)$ – representa a correlação da entrada com a saída do VCO, atrasada em 90° . O VCO é controlado pelo ângulo instantâneo gerado pela frequência de entrada, somado ao erro de fase, que é o sinal em fase filtrado, normalizado pelo ganho K e integrado. Os sinais em fase e em quadratura representam o vetor estacionário do sinal de entrada, na forma retangular, mostrado em (1).

$$v_{in} = P + jQ \quad (1)$$

IV. TRANSFORMADA CLARK E PARKE

Considerado como um método matemático a Transformada de Clarke transforma o sinal trifásico senoidal (ABC) em um sistema estacionário bifásico ($\alpha\beta$), com duas componentes senoidais defasadas em 90° . As transformadas direta e indireta são realizadas de acordo com as Equações (2) e (3), respectivamente.

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

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

A Transformada de Park, também é um método matemático que realiza a transformação do referencial estacionário ($\alpha\beta$) para um referencial girante bifásico (dq), com duas componentes contínuas defasadas em 90° . As transformadas direta e indireta são realizadas de acordo com as Equações (4) e (5), respectivamente. Nesta transformação, o referencial girante fica defasado do referencial estacionário por um ângulo.

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\hat{\theta} & \text{sen}\hat{\theta} \\ -\text{sen}\hat{\theta} & \cos\hat{\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\hat{\theta} & -\text{sen}\hat{\theta} \\ \text{sen}\hat{\theta} & \cos\hat{\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \quad (5)$$

A utilização do sistema bifásico dq é muito interessante pois permite tratar variáveis senoidais apenas por sua amplitude, o que facilita a aplicação de métodos de controle sobre estas variáveis.

V. METODOLOGIA

A fim de verificar o comportamento da geração conectada através de conversor de frequência com a rede elétrica, com sincronismo realizado através da utilização do PLL, foi elaborada simulação no software MATLAB®, seguindo as estruturas conforme mostrada na figura 3, sendo a modelagem exibida na Figura 4.

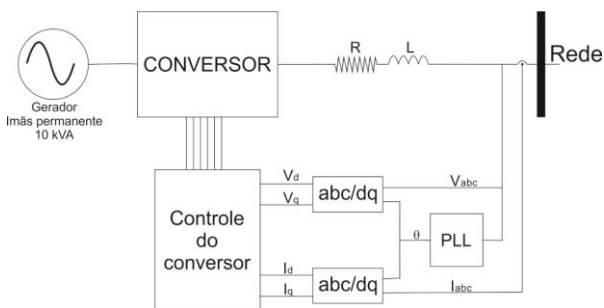


Fig.3 Diagrama de blocos modelagem da MiniGD no MATLAB®.

Para esta modelagem considera-se como máquina conversora um gerador de ímãs permanentes. A opção pelo mesmo é devido a sua simplicidade na excitação, pois o mesmo não requer controle de campo.

Para garantir o sincronismo entre a rede elétrica e a tensão fornecida na saída do conversor foi utilizado um circuito PLL, a fim de identificar a frequência da rede e fornecer o ângulo para as transformações abc para dq e vice-versa. O PLL utilizado recebe em sua entrada o sinal de tensão V_a da rede elétrica e proporciona na saída a frequência da rede elétrica e o ângulo de fase da tensão de referência V_a . Na modelagem realizada além de um circuito PLL para identificação de frequência foi também implementada malha de controle para garantir o sincronismo com a rede elétrica, mostrada na figura 5.

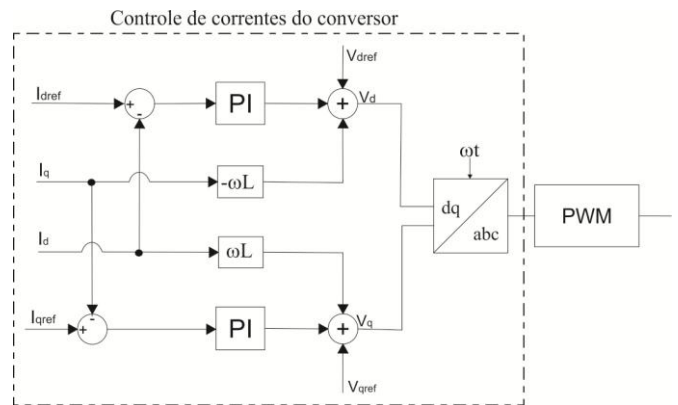


Fig.5 Bloco de controle de ângulo PLL.

A partir da figura 5 observa-se que para garantir o sincronismo foi realizada malha de controle tendo como sinal de realimentação o sinal V_q obtido na transformada abc para dq, sendo este sinal comparado com o valor de referência definido, a fim de obter o sinal de erro da malha de controle. Deve-se observar que o controle nesta malha age com o objetivo de manter o erro com valor nulo, ou seja $V_q=0$, garantindo assim o sincronismo do conversor com a rede elétrica. A partir do ângulo obtido na saída do PLL é também realizada a transformada das correntes da referência abc para dq, resultando as correntes de eixo direto e quadratura, I_d e I_q .

O controle do conversor é baseado nos sinais das correntes I_d e I_q . As malhas de controle implementadas buscam controlar o valor da corrente I_d , em função do valor de potência ativa que da geração, e o valor da corrente I_q é dada em função da energia reativa que se deseja controlar na saída do conversor. Na Figura 6 é apresentada as malhas de controle implementadas para as correntes I_d e I_q .

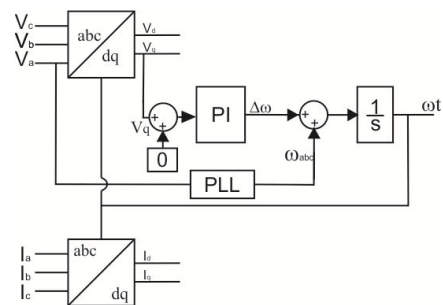


Fig.6 Malha de controle das correntes I_d e I_q .

A malha de controle da corrente I_d mostrada na Figura 6 tem como valor de referência (I_{dref}) obtido a partir da regulação de tensão do link CC do conversor, conforme mostra a Figura 7.

Este valor de corrente de referência é comparado com o valor de corrente I_d da rede elétrica dando origem ao sinal de erro de entrada no controlador PI, que por sua vez gera o incremento de tensão necessário para controlar o valor de corrente injetada na rede pelo conversor. Esse incremento de tensão é somado ao valor de V_{dref} , que é o valor de amplitude da rede elétrica, e ao fator ωL multiplicado por I_q , fator responsável pelo desacoplamento das correntes I_d e I_q . A malha de controle de I_q é em estrutura muito semelhante a da corrente I_d , com a diferença que a partir do objetivo de

manter a injeção somente de potência ativa pelo conversor, manteve-se a corrente I_{qref} com valor nulo. O resultado desta malha de controle são as tensões V_d e V_q que serão tomadas como referência para alcançar os valores de correntes desejadas na saída do conversor. As tensões V_d e V_q são transformadas nas tensões V_{abc} que serão utilizadas como ondas de controle no PWM do conversor.

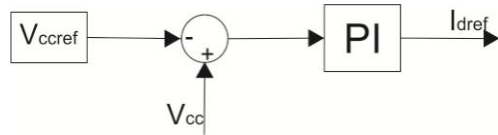


Fig.7 Malha de controle da tensão do barramento CC do conversor.

O conversor de frequência é o elemento responsável por executar a interface entre a geração e a rede elétrica, devendo injetar na rede toda a potência elétrica fornecida pela geração. Assim, podemos observar o conversor conforme as duas funções principais por ele executadas, a retificação da potência gerada em corrente alternada (conversor CA/CC) e a inversão executada, transformando a tensão CC em corrente alternada para ser fornecida a rede elétrica (conversor CC/CA).

O conversor CC/CA basicamente realiza a conversão da tensão alternada fornecida pelo gerador de ímãs permanentes para tensão contínua que alimenta o elo CC do conversor, considera-se um retificador trifásico de onda completa em ponte. O retificador é constituído por seis diodos dispostos conforme a Figura 8.

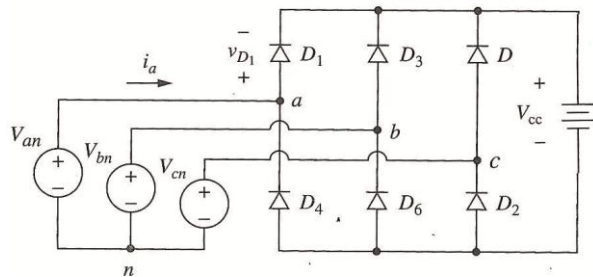


Fig.8 Retificação CA/CC.

O conversor CC/CA é responsável por realizar o chaveamento do conversor com o objetivo de entregar para rede elétrica a energia convertida pela geração. Para realizar este chaveamento foram utilizados 6 IGBT's, considerando o comportamento de chaves ideais estes são conectados conforme a Figura 9.

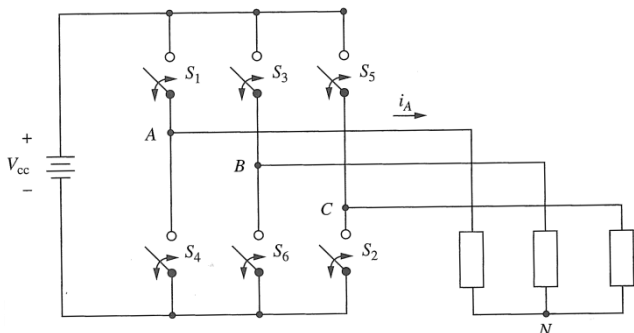


Fig.9 Circuito de chaveamento dos IGBT's para conversão CC/CA.

O acionamento do conversor CC/CA é realizado por modulação de largura de pulso (PWM). A forma de PWM escolhida para o disparo dos IGBT's foi de seis degraus. Para obter a lógica de acionamento dos IGBT's foi utilizado o método de comparação de uma onda triangular (dita onda de controle) com a onda senoidal (dita onda de referência). A onda triangular define a frequência de acionamentos dos IGBT's, enquanto a onda senoidal define a fase e a frequência da tensão na saída do conversor. As três ondas senoidais para controle do disparo dos IGBT's foram obtidas a partir da transformada dq para abc resultando nas ondas de controle V_{ac} , V_{bc} e V_{cc} . Os períodos em que a onda de controle tem valor maior que a onda de referência determinam os períodos em que os IGBT's devem ser acionados [8]. A tabela 1 mostra a sequência de acionamento adotada.

TABELA I
Sequência de acionamento.

Condição das chaves	Condição de acionamento
S1 é ligado	$V_{ac} > V_{tri}$
S2 é ligado	$V_{cc} < V_{tri}$
S3 é ligado	$V_{bc} > V_{tri}$
S4 é ligado	$V_{ac} < V_{tri}$
S5 é ligado	$V_{cc} > V_{tri}$
S6 é ligado	$V_{bc} < V_{tri}$

VI. RESULTADOS

A sincronização do conversor com a rede foi verificada em duas situações: na entrada da geração e na ocorrência de uma perturbação na frequência da rede elétrica. A seguir serão analisados os comportamentos do sistema para os dois casos.

- Na entrada da geração: a simulação para verificar o sincronismo do conversor com a rede elétrica no momento da partida da fonte de geração foi realizada aplicando-se uma rampa de torque no eixo do gerador no período de 0 a 1 s com valor final de 60 N.m. A figura 10 mostra a velocidade de rotação do gerador.

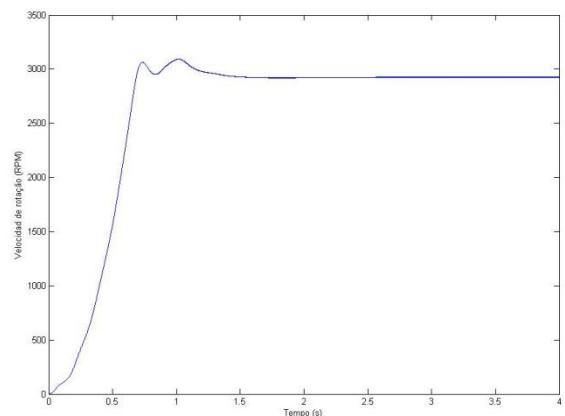


Fig.10 Velocidade de rotação do gerador.

Observa-se na figura 10 que o gerador tem seu eixo acelerado até um valor máximo e então tende a acomodação com o avanço do tempo. O pico ocorrido na velocidade é

devido a inércia da máquina, visto que o valor de torque simulado como entrada é aplicado em um curto intervalo de tempo.

Enquanto o eixo do gerador é acelerado ocorre a indução de tensão nas bobinas do gerador e conseqüentemente o capacitor do link CC começa a ser carregado e adquire o valor de tensão de acordo com a velocidade de rotação do gerador.

A Figura 11 mostra a tensão do link CC, nesta é possível observar a relação existente entre a tensão no link CC com a velocidade da máquina. Observa-se que o link CC adquire um valor de tensão constante em regime permanente devido ao controle aplicado sobre esta variável, que tem objetivo de manter este valor de tensão em 650V.

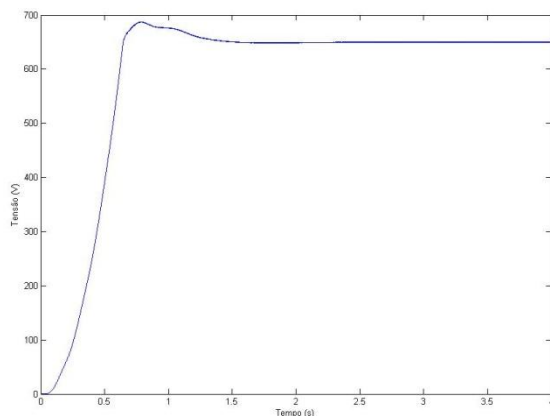


Fig.11 Tensão no link CC.

A condição utilizada para que o conversor inicie a injeção de potência na rede elétrica considera o valor de tensão do barramento CC ($V_{cc}=650V$) e o valor de tensão de quadratura ($V_q=0$). Assim, pode-se observar na Figura 12 que o valor de corrente I_d inicialmente tem valor nulo (devido a condição de tensão do barramento CC não ser satisfeita). Contudo, após um certo período de tempo o valor de corrente I_d começa a aumentar até atingir o valor de regime permanente, assim como acontece com o valor de tensão no link CC do conversor, observado na Figura 11.

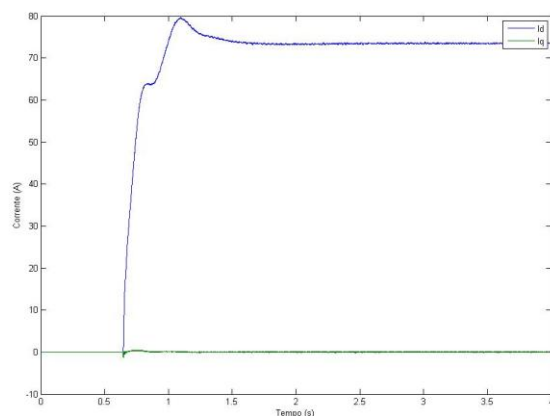


Fig.12 Correntes I_d e I_q .

Na Figura 13, no instante de tempo próximo 0,646 segundos, o conversor inicia a injeção de potência na rede elétrica, sendo possível verificar que a tensão da fase A na saída do conversor (V_a conversor) está em fase com a tensão da fase A da rede (V_a rede), satisfeito assim o sincronismo entre o conversor e a rede elétrica.

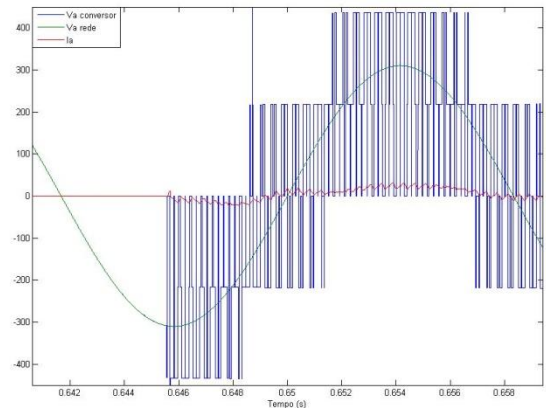


Fig.13 Instante inicial do sincronismo.

No instante inicial da conexão do conversor com a rede elétrica a corrente injetada passou de um valor nulo até o valor de regime permanente, estabilizando-se com amplitude de aproximadamente 70A (sendo facilmente visualizado na Figura 12). Na Figura 14 é mostrado o comportamento da corrente da fase A e as tensões da fase A do conversor e da rede elétrica em regime permanente. É interessante observar que a corrente da fase A (I_a) está em fase com a tensão da rede da fase A (V_a rede), indicando que somente potencia ativa esta sendo entregue para a rede elétrica. Outrossim, deve-se observar o deslocamento de fase existente entre a tensão da rede da fase A (V_a rede) e a tensão na saída do conversor na fase A (V_a conversor), deslocamento este necessário para garantir que a corrente entregue pelo conversor esteja em fase com a tensão da rede elétrica, pois entre a saída do conversor e a rede elétrica existe um indutor e por isso a tensão na saída do conversor deve se manter adiantada em relação a tensão da rede elétrica.

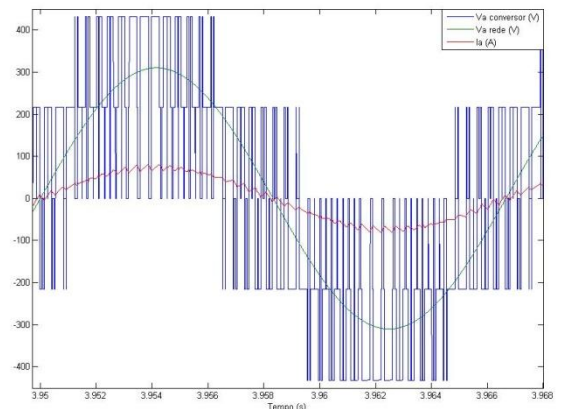


Fig.14 Regime permanente.

VII. CONCLUSÕES

A geração distribuída é um importante avanço no modo de geração e consumo de energia elétrica, dando a oportunidade aos clientes tornar-se parte do problema e da solução. Na busca pelo consumo mais eficiente e consciente da energia elétrica. Nesse panorama atual verifica-se indispensável o aperfeiçoamento dos conversores de frequência que são os elementos chave para o avanço da geração de energia elétrica por meio de fontes alternativas, tal como a de origem hidráulica em pequenos aproveitamentos.

Portanto, verificou-se neste trabalho a utilização de circuito PLL como elemento responsável por garantir o sincronismo do conversor com a rede elétrica, o que torna possível o conversor controlar de maneira eficiente e confiável a energia injetada na rede elétrica.

Os resultados das simulações comprovam que o controle baseado no circuito PLL alcança o objetivo do sincronismo, tanto no início da operação da máquina, onde o sistema sofre com a inércia da conversão eletromecânica como em regime permanente onde é alcançada a operação estável do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL, Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acessado em: outubro de 2016.
- [2] ANEEL, Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acessado em: outubro de 2016.
- [3] HSIEH, Guan C.; HUNG, James C., "Phase-Locked Loop Techniques – A survey", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 3, pp. 609-615, 1996.
- [4] TCL2932, "Phase-Locked-Loop Building With Analog Voltage-Controlled Oscillator and Phase Frequency Detector", Texas Instruments, 1996.
- [5] Felix A. Farret. Aproveitamento de Pequenas Fontes de energia Elétrica. Editora UFSM. 2ª Edição.2010.
- [6] A. Ghoshal, V. John, "A Method to Improve PLL Performance Under Abnormal Grid Conditions", Proc. Of National Power Electronics Conference, Dec. 2007.
- [7] HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Laszlo, "Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", New York, EUA – IEEE Press, 1999.
- [8] Hart, Daniel W. Eletrônica de Potência – Análise e projetos de circuitos. Editora AMGH. 1ª Edição. 2012.

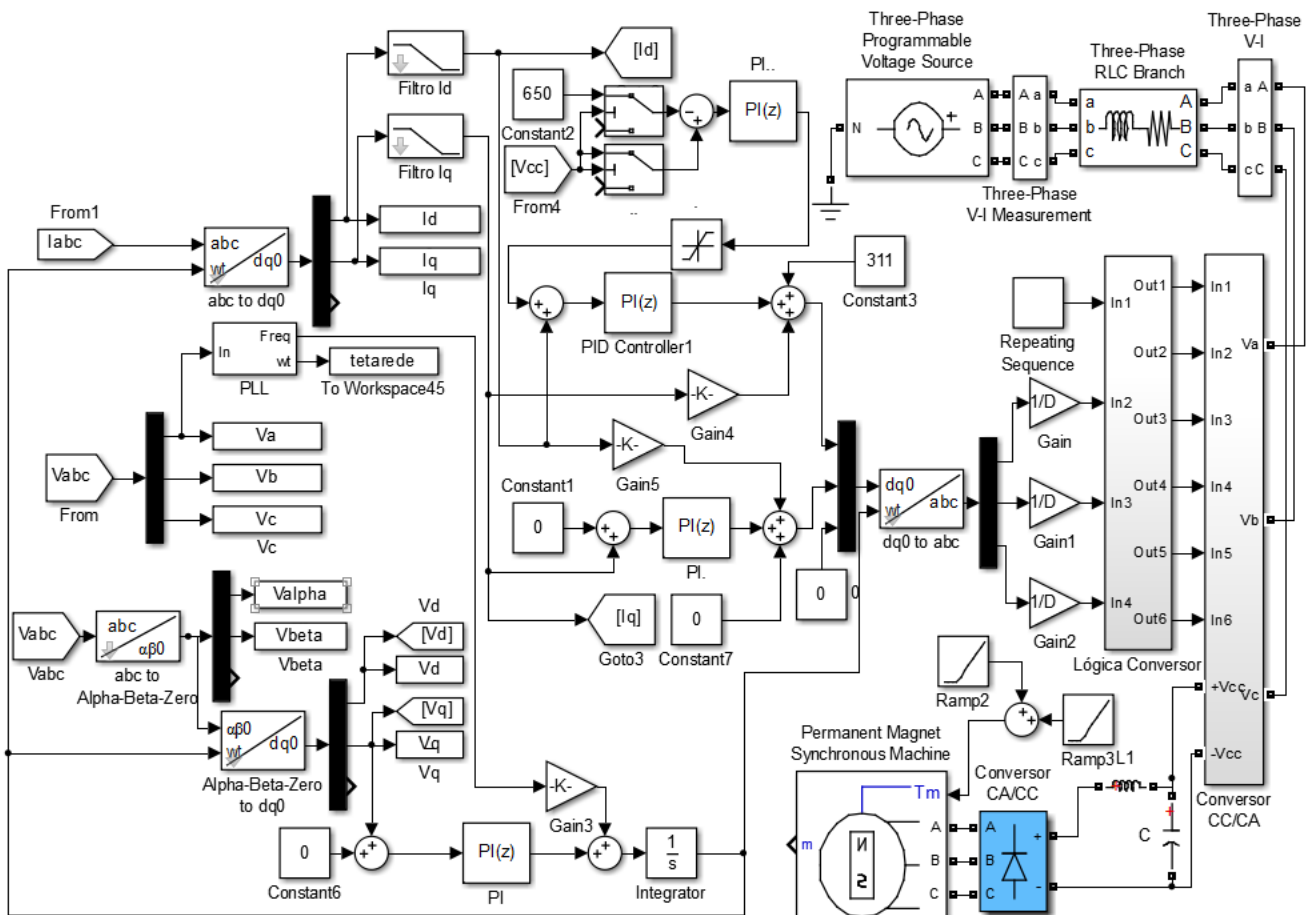


Fig.4 Implementação no software MATLAB®.