

# Power Conditioning Performance Analysis for a Fuel Cell Power Plant

João Carvalheiro <sup>(1)</sup>, Rui Castro <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> IPT, Instituto Politécnico de Tomar  
(Polytechnics Institute of Tomar)  
Quinta do Contador – Estrada da Serra, 2300-313 Tomar (Portugal)  
Tel.:+351 249 328150, fax:+ 351 249 328197, e-mail: [jcarvalheiro@ipt.pt](mailto:jcarvalheiro@ipt.pt)

<sup>(2)</sup> IST, Instituto Superior Técnico / CEEL, Centro de Energia Eléctrica do IST  
(Technical University of Lisbon / Electrical Energy Centre)  
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa (Portugal)  
Tel.: +351 21 8417287, fax: + 351 21 8417421, e-mail: [rcaastro@ist.utl.pt](mailto:rcaastro@ist.utl.pt)

**Abstract:** This paper presents the development of a power conditioning system to interface a fuel cell and the power grid, mainly in what concerns its capability for either VAR compensation or voltage support through reactive power control. Voltage control and current control are studied to select the more adequate control mode. Different current control methods are possible but one of the objectives of this paper is to demonstrate the good performance of sliding control mode in this application, especially in what concerns its properties in active filter control. The performances of different line filters are focused, taking mainly in consideration its contribution to the power quality grid connection. In order to demonstrate the power conditioning system capabilities either for VAR compensator or voltage support, two modes of operation are implemented: a real / reactive power control mode and a real power / voltage control mode. An integrated fuel cell / inverter system model was simulated and the voltages and currents in the point of common coupling and in the fuel cell output are presented. The results obtained confirm the criteria adopted in the development of this power conditioning system to interface a fuel cell to a power grid.

**Key Words:** Fuel cells, power grid, current control, real/reactive power control, voltage control, power quality.

## 1 Introdução

Como é notório, as fontes de energia renováveis têm vindo a verificar uma crescente penetração no mercado de energia eléctrica. É de prever que o aumento destas fontes de energia primária não controláveis (sobretudo solar, eólica e hídrica) venha a colocar novos problemas ao operador da rede eléctrica, no que respeita às margens de segurança de fornecimento. Estes problemas requerem uma análise e avaliação apropriada, de modo a minimizar o impacto das fontes de energia renovável no sistema actual de energia eléctrica.

As características das pilhas de combustível são especialmente adequadas para a produção de energia eléctrica como um sistema de produção distribuída,

actuando na base do diagrama de carga e operando de uma forma controlada. Para além disso, a utilização de um recurso vasto – o hidrogénio – como “combustível”, o carácter de tecnologia “limpa”, a alta eficiência em quase toda a gama de funcionamento, a possibilidade de produção combinada de calor e energia eléctrica e a alta fiabilidade destas unidades, são boas razões para acreditar no desenvolvimento da produção de energia eléctrica por pilhas de combustível.

Actualmente, os custos de produção de pilhas de combustível estão a diminuir, tornando-se claro o estabelecimento de um mercado de electricidade a partir de pilhas de combustível num futuro próximo.

São várias as vantagens na inserção distribuída de unidades de pilhas de combustível de pequena capacidade, quando comparado com a inserção de uma unidade convencional de produção numa localização centralizada. Desde logo, a fiabilidade acrescida proporcionada por um serviço não intermitente.

Depois, a capacidade de produção adicional pode ser acrescentada exactamente onde é necessária. Isto é uma vantagem, especialmente em áreas onde as linhas e transformadores de alimentação estejam próximos de atingir os seus limites de capacidade, pois o aumento incremental das cargas pode ser efectuado a partir de pequenas unidades de produção distribuída, localizadas na vizinhança.

Finalmente, o sistema de interligação à rede eléctrica das pilhas de combustível pode ser concebido de modo a oferecer muito mais do que somente uma fonte de energia activa. O mesmo conversor, que converte a tensão DC da pilha de combustível numa tensão AC compatível com a rede eléctrica, pode servir simultaneamente como um compensador de energia reactiva bem como um filtro activo, com um pequeno aumento dos valores nominais, de modo a suportar estas capacidades extras.

Este artigo trata de sistemas geradores de energia usando pilhas de combustível, debruçando-se em particular sobre a sua ligação à rede eléctrica através de uma interface com dispositivos electrónicos de potência.

## 2 Topologia e Estratégia de Controlo do Inversor

As pilhas de combustível apresentam uma tensão de saída DC, que necessita de ser convertida para uma tensão AC antes de se efectuar a sua ligação ao sistema de energia eléctrica. Os inversores utilizados para a interface com a rede eléctrica são habitualmente designados por inversores de tensão (*Voltage Source Inverter – VSI*) e inversores de corrente (*Current Source Inverter – CSI*). No caso concreto da ligação de uma pilha de combustível a uma rede eléctrica, dadas as características de fonte de tensão de uma pilha (modelizada por uma força electromotriz interna em série com uma resistência), deverá ser utilizado um inversor de tensão (VSI) (Fig. 1).

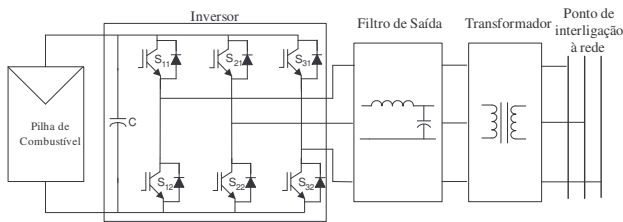


Fig. 1 – Ligação da pilha de combustível à rede eléctrica através de um VSI

O objectivo do condensador de entrada no inversor de tensão é, para além de ser um armazenador de energia, servir de filtro, para a pilha de combustível. Na realidade, devido à comutação dos dispositivos semicondutores do inversor, a corrente solicitada pelo inversor é descontínua, apresentando um *ripple* cuja frequência é igual à frequência de comutação do inversor.

Dado que uma pilha de combustível apresenta uma certa inércia, caso haja solicitações de corrente elevadas e rápidas, a sua *f.e.m.* irá diminuir proporcionalmente, facto este indesejável para a pilha e para o próprio funcionamento inversor.

Assim, é de todo o interesse que a corrente solicitada à pilha de combustível seja o mais constante possível, pelo que é utilizado um condensador à entrada do inversor de modo a diminuir o seu *ripple*. A componente de alta-frequência da corrente de entrada do inversor deverá circular no condensador e a componente de corrente contínua deverá ser fornecida pela pilha de combustível. Considerando-se constante a corrente da pilha de combustível entre comutações, então a variação da tensão do condensador é devida à corrente por si fornecida de modo a garantir as variações instantâneas da corrente de entrada do inversor.

Para se obter um sistema que injecte na rede eléctrica correntes sinusoidais com um baixo conteúdo harmónico, torna-se necessário que o inversor se encontre ligado à rede eléctrica através de um filtro, pois o transformador de interligação do inversor à rede eléctrica não é suficiente para garantir a qualidade de energia. A selecção deste filtro é importante porque afecta quer a qualidade de energia, quer a resposta dinâmica do sistema.

Na concepção de um controlador para o inversor, que garanta o fornecimento de energia por parte de uma pilha

de combustível a uma rede eléctrica, dois aspectos tomam particular importância:

- Garantia da qualidade de energia fornecida (neste caso, eliminação de qualquer harmónica de corrente de baixa ordem que possa ser gerada pelo inversor);
- Controlo do fluxo de energia activa e reactiva de uma forma independente.

### A. Garantia da Qualidade de Energia

Tratando-se da ligação a uma rede eléctrica de grandes dimensões, é difícil ter o controlo da qualidade da forma de onda da tensão. A qualidade da energia é então definida pela qualidade da forma de onda da corrente.

Em termos de normalização sobre qualidade de energia, a versão portuguesa da Norma Europeia EN 50 160 – *Características da Tensão Fornecida pelas Redes de Distribuição Pública de Energia Eléctrica*, que se aplica aos níveis de BT e MT e que descreve as características principais da tensão de alimentação no ponto de entrega ao cliente, não faz qualquer referência explícita ao conteúdo harmónico de correntes injectadas na rede eléctrica por produtores, apenas estabelecendo que a distorção harmónica total (THD) da tensão no ponto de interligação não deve ultrapassar 8%.

Na falta de referências específicas de normas nesta área, recorreu-se à recomendação IEEE std 519-1992 “*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, largamente utilizada. Esta recomendação refere que um produtor de energia eléctrica não poderá injectar na rede eléctrica (até aos 69kV) correntes com uma distorção harmónica total superior a 5% (THD).

Este valor limite também é seguido pela recomendação IEEE std 1547-2003 “*IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*”, que mais recentemente tem vindo a ser seguida por este tipo de aplicações. Este valor limite de THD para a corrente injectada na rede eléctrica, é o valor que será seguido como referência neste estudo.

Apresentando a tensão de saída do inversor um certo conteúdo harmónico (associado à frequência de comutação dos dispositivos semicondutores do inversor), para que o valor máximo de THD da tensão no ponto de interligação não seja atingido (8%), é preciso que a corrente de saída do inversor e injectada no ponto de interligação, apresente um comportamento o mais próximo de uma sinusóide, com o menor conteúdo harmónico possível.

### B. Controlo por Corrente

No que respeita aos modos de controlo, a classificação dos inversores é feita em termos de inversores controlados por tensão (*voltage-controlled inverter – VCI*) e inversores controlados por corrente (*current-controlled inverter – CCI*).

O inversor controlado por corrente é o mais indicado para a aplicação em análise [1].

Neste modo de operação (CCI), o controlador de corrente deverá garantir que a corrente seja controlada instantaneamente seguindo a forma de onda da

referência. Esta forma de onda de referência da corrente é uma senoide com a amplitude desejada, gerada pelo controlador de corrente, independentemente da forma de onda da tensão no ponto de interligação (que poderá conter um certo conteúdo harmónico que não interessa passar para a referência da corrente) e com um determinado desvio de fase relativamente à tensão no ponto de interligação.

Com esta concepção do controlador do inversor, o efeito das harmónicas presentes na tensão da rede eléctrica (principalmente as de baixa ordem), na corrente de saída é desta forma minimizado, melhorando-se a qualidade de energia e comportando-se assim o inversor para a rede eléctrica como um gerador de alta qualidade de energia.

Na concepção de um controlador para o inversor, outro dos aspectos com particular importância, é o controlo do fluxo de energia activa e reactiva de uma forma independente. Este modo de controlo apresenta a vantagem de, ao contrário do verificado no controlo por tensão, não apresentar nenhum acoplamento entre o sinal de comando da potência activa e da potência reactiva.

### C. Garantia de Sincronismo com a Rede Eléctrica

Para o controlo da potência activa e reactiva, é necessário que a referência da corrente esteja sincronizada em relação à tensão da rede eléctrica no ponto de interligação. A falta de sincronismo é suficiente para uma diferença entre a referência definida para o valor de potência (activa e reactiva) e o valor efectivamente medido no ponto de interligação, com consequências económicas negativas para o promotor da unidade de produção. No entanto, esta sincronização deve ser feita de tal forma que seja garantida a imunidade da qualidade de energia apresentada pelo inversor face ao conteúdo harmónico da tensão da rede eléctrica no ponto de interligação.

A melhor forma de obter o seguimento da fase da tensão da rede eléctrica no ponto de interligação, é utilizar uma cadeia de bloqueio de fase (*phase-locked loop* – PLL). Existem diferentes métodos de realização de um PLL para um sistema trifásico de tensões. No caso de um sistema desequilibrado ou com distorção harmónica, o melhor método que de uma forma precisa permite o seguimento da fase da tensão da rede eléctrica, apesar da distorção, consiste na transformação de variáveis, da tensão trifásica da rede eléctrica, para o referencial dq e a utilização de uma cadeia fechada com um controlador PI de modo a seguir o valor da fase do referencial [1].

### D. Controlo de Corrente por Modo de Deslizamento (*Sliding Mode Control*)

No caso concreto do controlo da corrente de saída de um inversor ligado à rede eléctrica, a grande maioria dos estudos realizados faz uso de sistemas de controlo lineares. Todos estes estudos fazem uso da modulação por largura de impulso (*pulse width modulation* – PWM) ou da modulação vectorial (*space-vector modulator*) para geração das funções de comutação dos dispositivos semicondutores. Estas modulações são caracterizadas por utilizarem uma frequência de comutação dos dispositivos

semicondutores constante, apresentando a corrente de saída um conteúdo harmónico bem definido.

No entanto os conversores comutados apresentam uma topologia variante no tempo e são descritos por equações descontínuas características de um sistema não linear. Assim, para além dos sistemas de controlo lineares, são também utilizados no controlo de corrente sistemas de controlo não lineares.

Sabe-se também que um sistema de produção distribuída por pilha de combustível ligado à rede eléctrica através de um inversor, para além do fornecimento de energia activa e reactiva, poder ser também utilizado como filtro activo (Fig. 2).

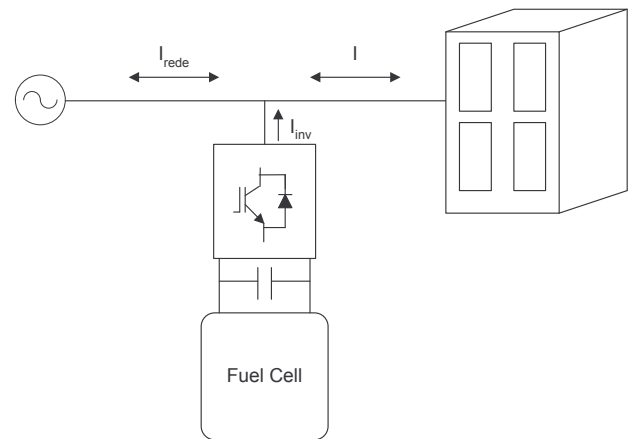


Fig. 2 – Pilha de combustível com características de filtro activo e com a possibilidade de fornecer energia activa e reactiva

Os filtros activos são colocados na sua maioria em paralelo com cargas não lineares. Têm a capacidade de compensar as harmónicas presentes na corrente que alimenta as cargas, gerando uma corrente de saída de modo a que não sejam introduzidas na rede eléctrica correntes com harmónicas e permitindo também, através do controlo da potência reactiva, apresentar as cargas à rede eléctrica com factor de potência unitário.

Para uma aplicação com estas características (controlo de potência activa e reactiva e filtro activo), a utilização de um sistema de controlo não linear e rápido, é o mais indicado. O controlo por modo de deslizamento (*sliding mode control*) apresenta o comportamento de um sistema de controlo de estrutura variável, tendo como principais vantagens a sua rápida resposta dinâmica e robustez, que advêm da facilidade de implementação, que elimina moduladores convencionais e compensadores lineares de retroacção [1].

## 3 Filtro de Saída e Qualidade de Energia

A maioria das modulações utilizadas pelos sistemas de controlo de inversores garante que a tensão de saída do inversor está livre de distorção harmónica de baixa frequência. No entanto, tal já não se verifica com as harmónicas de maior frequência, sendo necessário utilizar um filtro de saída na ligação do inversor à rede eléctrica, de modo a garantir que a corrente de saída do inversor se aproxime o mais possível de uma senoide,

cumprindo os limites de emissão de harmónicas impostos à saída do inversor. Estas harmónicas de maior frequência existentes na tensão de saída do inversor apresentam características diferentes segundo a modulação utilizada.

No dimensionamento do filtro de saída, verifica-se que quanto maior for a frequência de comutação do inversor menor será o valor do filtro. Assim, do ponto de vista de dimensão e de custo dos diversos componentes do filtro, é desejável que a frequência de comutação do inversor seja elevada.

No entanto, a frequência de comutação do inversor está condicionada pelas limitações tecnológicas que os dispositivos semicondutores apresentam actualmente, não permitindo que se trabalhe com frequências muito elevadas (abaixo da dezena de kHz, para níveis de potência da ordem da centena de kVA). Para além destas limitações, há que ter especialmente em conta também os fenómenos de compatibilidade electromagnética.

Os filtros passa-baixo mais utilizados são de três tipos: o filtro L, o filtro LC e o filtro LCL.

O filtro L é um filtro de primeira ordem que é obtido utilizando uma bobina instalada em cada fase em série. O valor da indutância L é escolhido para limitar o *ripple* da corrente de saída do inversor.

Dependente do nível poluição harmónica de maior frequência, o filtro L pode não ser suficiente para filtrar (atenuar) essas componentes, e assim ser necessário introduzir uma impedância em paralelo com a saída do inversor que apresente um valor baixo para essas frequências (caso do modulador PWM por onda sinusoidal, onde as harmónicas da tensão de saída do inversor verificam-se a frequências próximas dos múltiplos da frequência de comutação). O elemento que apresenta estas características de impedância é o condensador.

Assim, quando se pretende uma maior atenuação nas frequências mais elevadas, é utilizado um filtro de segunda ordem LC (Fig. 3).

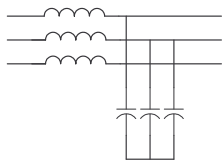


Fig. 3 – Topologia de um filtro LC

Por outro lado existe a necessidade de que o condensador apresente um valor elevado de impedância, de modo a minimizar o impacto do conteúdo harmónico da tensão no ponto de interligação na corrente de saída do inversor [2].

Tratando-se o condensador de uma fonte de energia reactiva, existe o fornecimento de corrente para a rede eléctrica por parte do condensador. Esta corrente (que se soma à corrente de saída do inversor), tendo o seu conteúdo harmónico dependente do conteúdo harmónico da tensão no ponto de interligação, irá contribuir para a “poluição” harmónica da corrente fornecida à rede eléctrica, podendo comprometer a qualidade de energia

no ponto de interligação (e comprometendo um dos requisitos de concepção do controlador do inversor).

Assim, na escolha do valor do condensador do filtro, dois aspectos devem ser tidos em conta: por um lado, pode exigir-se um valor elevado da capacidade do condensador, de modo a que este funcione, para a frequência de comutação, como uma impedância de reduzido valor em paralelo com a saída do inversor; por outro, requer-se um valor baixo da capacidade do condensador de modo a apresentar uma impedância elevada. O condensador é por isso dimensionado através de um compromisso entre estas duas situações [1].

Quando se pretender ainda uma melhor atenuação, um filtro de terceira ordem LCL é utilizado (Fig. 4).

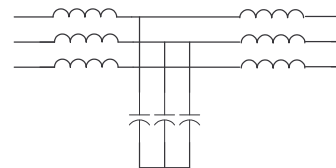


Fig. 4 – Topologia de um filtro LCL

Este filtro apresenta principalmente duas vantagens relativamente ao filtro LC: melhor atenuação (como já referido) para dimensões idênticas e por outro lado apresenta uma saída indutiva para a rede eléctrica, diminuindo a contribuição do conteúdo harmónico da corrente injectada pelo condensador na rede eléctrica no ponto de interligação. Para a indutância do lado da rede eléctrica é muitas vezes utilizado o transformador de ligação à rede eléctrica [2] e noutros casos, de modo a diminuir o custo do sistema, conta-se inclusive com a impedância da rede eléctrica [3].

Apesar dos filtros do tipo LC e LCL apresentarem melhores características atenuantes, problemas reportados de ressonância com a rede eléctrica [3], [4], [5] condicionam a sua utilização, sendo necessário um estudo detalhado para a sua aplicação, face a cada caso em concreto.

## 4 Modos de Controlo na Ligação à Rede Eléctrica

A interface de electrónica de potência permite ao promotor optar por dois modos de controlo: ou operar a unidade em modo PQ (potência activa e reactiva constantes) ou em modo PV (potência activa e tensão constantes) [1].

### A. Controlo PQ

O modo de controlo PQ tem como objectivo garantir a potência activa e reactiva entregue pelo inversor à rede eléctrica. Neste modo de controlo, os valores de referência da potência activa e reactiva são definidos pelo operador do sistema de distribuição da rede eléctrica.

Na Fig. 5, estão representados em termos de blocos principais, os diferentes controladores associados ao sistema.

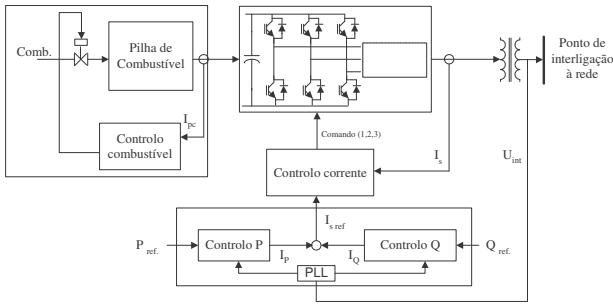


Fig. 5 – Controladores do sistema para o controlo de P e Q

A referência do controlador de corrente de saída do inversor ( $I_{s \text{ ref}}$ ) é gerada pelo controlador da potência activa (“Controlo P”) e da potência reactiva do inversor (“Controlo Q”). A forma de onda da corrente de referência é assim obtida a partir da soma das formas de ondas da sua componente real ( $I_p$ ) e da sua componente imaginária ( $I_q$ ).

Fazendo a medida do valor eficaz da tensão no ponto de interligação (através do PLL), a amplitude da componente real ( $I_p$ ) e da componente imaginária ( $I_q$ ) da corrente de referência pode ser obtida a partir, respectivamente, dos valores das potências activa e reactiva de referência definidos pelo operador do sistema.

### B. Controlo PV

Até agora, partiu-se do princípio que na ligação de um inversor à rede eléctrica, a tensão no ponto de interligação é constante. Nesta situação a tensão flutua em função do comportamento da rede eléctrica à qual o sistema se encontra ligado e também em função da energia activa e reactiva fornecidas, o que, dada a resposta dinâmica do inversor, pode considerar-se como sendo constante.

No caso de se estar na presença de uma rede eléctrica “fraca” (baixa potência de curto-circuito no ponto de interligação), o inversor pode também ser usado para controlar a tensão no ponto de interligação, através do controlo da energia reactiva fornecida à rede eléctrica. Assim, deixaria de ser o operador do sistema a definir a energia reactiva fornecida pela pilha de combustível (em que nesse caso a tensão no ponto de interligação seria flutuante), passando agora a energia reactiva fornecida a ser flutuante, de modo a manter constante a tensão no ponto de interligação (definida agora pelo operador do sistema).

Desta forma, a componente imaginária da corrente de referência deixa de ser controlada a partir do controlador de potência reactiva e passa a ser definida pelo controlador de tensão (“Controlo U”), tal como está indicado na Fig. 6.

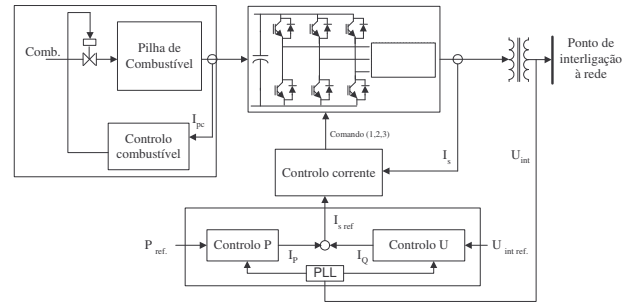


Fig. 6 – Controladores do sistema para o controlo de P e U

Este controlador calcula o erro da tensão relativamente ao valor de referência para a tensão no ponto de interligação ( $U_{int \text{ ref}}$ ). A partir desse erro, um compensador proporcional integral, irá gerar o valor de referência para a componente imaginária da corrente.

## 5 Modelização e Resultados de Simulação

Para a simulação do funcionamento conjunto da pilha de combustível e do inversor, foi utilizado a aplicação *MatLab/Simulink*.

A implementação do conjunto foi realizada através de vários blocos de acordo com a Fig. 7 [1].

Para a realização da simulação da ligação do conjunto pilha de combustível/inversor à rede eléctrica, foram utilizados os seguintes parâmetros característicos referentes a cada um dos seus componentes:

$$\text{Pilha de Combustível: } \begin{cases} \text{Molten Carbonate Fuel Cell} \\ P_n = 500 \text{ kVA} \\ T = 677^\circ \text{ C} \\ P = 1 \text{ bar} \\ \text{Utilização} = 75\% \end{cases}$$

$$\text{Inversores (dois em paralelo): } \begin{cases} S_n = 250 \text{ kVA} \\ \cos \phi_{\text{limite}} = \pm 0,85 \end{cases}$$

$$\text{Filtro de cada inversor: } \begin{cases} L = 1,1 \text{ mH} \\ R = 8 \text{ m}\Omega \end{cases}$$

$$\text{Transformador de interligação: } \begin{cases} S_n = 630 \text{ kVA} \\ U_n = 0,4/15 \text{ kV} \\ X_{cc} = 8\% \Leftrightarrow L_t = 65 \mu\text{H} \\ R_t = 2 \text{ m}\Omega \end{cases}$$

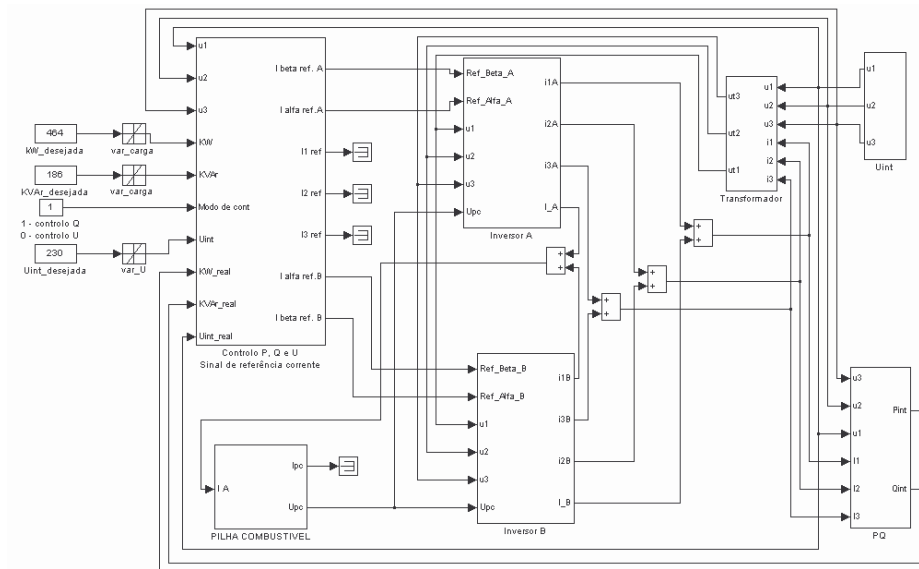


Fig. 7 – Diagrama de blocos de implementação em *Matlab/Simulink* do conjunto pilha de combustível e inversor

Relativamente às condições de simulação do modelo, há que ter em conta as limitações impostas pela actual legislação, à produção de energia reactiva nas horas fora de vazio (produção com  $\text{tg } \varphi = 0,4$ ) e nas horas de vazio (produção com  $\text{tg } \varphi = 0$ ). Outro aspecto a ter em conta, é que um produtor de energia eléctrica que vê a sua remuneração indexada à produção de energia activa, interessa-lhe maximizar a energia activa produzida. Deste modo, a operação de um sistema deste tipo vai ser sempre feita à máxima carga (500kVA), pelo que as simulações correspondem a esta situação.

Para além destes aspectos de operação, há que analisar também o efeito do conteúdo harmónico da tensão no ponto de interligação no funcionamento do inversor.

Duas situações diferentes foram estudadas. A primeira correspondeu à produção com  $\text{tg } \varphi = 0,4$ , sem conteúdo harmónico na tensão no ponto de interligação.

Dos resultados obtidos registaram-se os seguintes valores, representados nas Fig. 8:

- $i_3$  – Corrente de saída do inversor na fase 3;
- $i_{3\text{ref}}$  – Sinal de referência para a corrente de saída do inversor na fase 3;
- $U_{pc}$  – Tensão de saída da pilha de combustível;
- $I_{pc}$  – Corrente de saída da pilha de combustível.

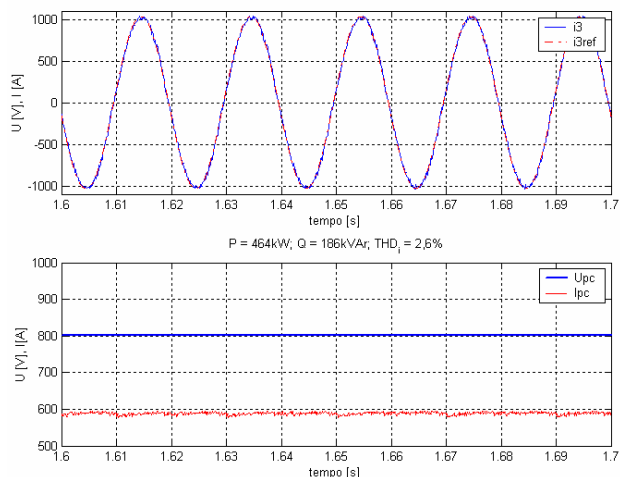


Fig. 8 – Resultados obtidos com  $P = 464\text{kW}$  e  $Q = 186\text{kvar}$  sem conteúdo harmónico na tensão no ponto de interligação

No que respeita ao comportamento da corrente de saída do inversor, verifica-se que as correntes injectadas no ponto de interligação seguem os seus sinais de referência. Quanto ao conteúdo harmónico da corrente, para esta situação, o valor da distorção harmónica total (THD) é de 2,6 %, valor este abaixo do valor máximo recomendado de 5%.

Relativamente à corrente e à tensão de saída da pilha de combustível, verifica-se que apresentam valores sem *ripple* significativo, confirmando o dimensionamento do condensador de entrada do inversor.

Dada a importância de analisar o comportamento do conjunto pilha/inversor perante um elevado conteúdo harmónico da tensão no ponto de interligação, foram simuladas as mesmas condições, mas agora com distorção harmónica da tensão no ponto de interligação (Fig. 9). O valor simulado de THD da tensão no ponto de interligação é de 7,0% (de recordar que o máximo permitido pela norma EN 50 160 é de 8%), tendo sido introduzidas na tensão no ponto de alimentação tensões harmónicas de baixa frequência (2ª, 5ª e 13ª harmónicas).

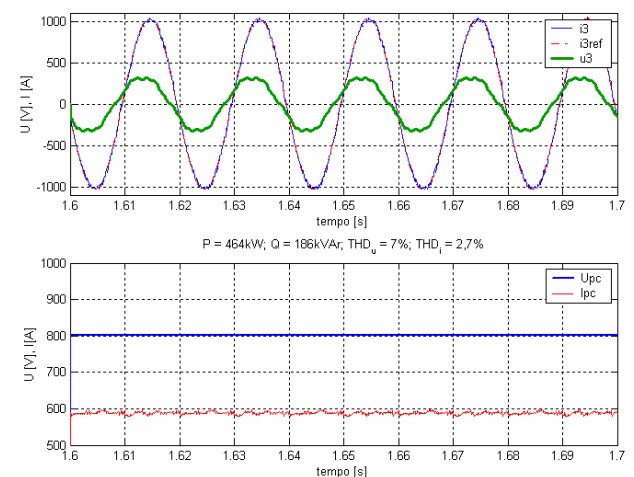


Fig. 9 – Resultados obtidos com  $P = 464\text{kW}$  e  $Q = 186\text{kvar}$  com conteúdo harmónico na tensão no ponto de interligação (7%)

Como se pode verificar, o conteúdo harmónico da tensão no ponto de interligação é elevado. Observando as correntes das três fases, verifica-se que o conteúdo harmónico da tensão do ponto de interligação não está presente de uma forma significativa na corrente injectada nesse ponto, uma das vantagens referidas anteriormente do controlo de corrente.

Relativamente à situação em que não havia distorção harmónica na tensão no ponto de interligação, agora a distorção harmónica total da corrente injectada no ponto de interligação é ligeiramente maior (2,7% em vez dos 2,6% registados) porém ainda abaixo do valor máximo de 5% e substancialmente inferior à distorção harmónica total da tensão (7,0%).

## 6 Conclusões

Neste artigo foram analisados os aspectos principais que condicionam a qualidade de energia e o controlo de potência no ponto de interligação à rede eléctrica de uma unidade de pilha de combustível.

Verificou-se que o modo de controlo do inversor de interligação que dá garantias de qualidade de energia (tendo como referência as normas e recomendações analisadas), de controlo do fluxo de energia activa e reactiva para a rede eléctrica e de controlo de tensão do ponto de interligação, é o controlo do inversor por corrente (*current-controlled inverter* – CCI).

Quanto ao modo de controlo da corrente de saída do inversor, confirmou-se, como se pretendia, que também é eficaz no controlo de corrente de saída de um inversor interligado à rede eléctrica.

A frequência de comutação utilizada no inversor e o dimensionamento do filtro de saída são interdependentes, verificando-se que o filtro será tanto menor quanto maior

for a frequência de comutação. Para o filtro de saída foram apresentados três tipos possíveis: filtro L, filtro LC e filtro LCL. Apesar dos filtros do tipo LC e LCL apresentarem melhores características atenuantes, problemas reportados de ressonância com a rede eléctrica condicionam a sua utilização, sendo necessário um estudo detalhado para a sua aplicação, face a cada caso em concreto.

O controlo proposto para a potência activa e reactiva no ponto de interligação demonstrou efectivo, apresentando independência entre o controlo da potência reactiva e da potência activa no ponto de interligação e da potência da pilha de combustível.

## Referências

- [1] Carvalheiro J.M.N., “Um Modelo de Pilhas de Combustível Ligadas ao Sistema de Energia Eléctrica”, *MSc Dissertation, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, Lisboa, September 2004.
- [2] Green T.C., Prodanovic M., “Control and Filter Design of Three-phase Inverters for High Power Quality Grid Connection”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, nº1, pp. 373 – 380, 2003.
- [3] Holmes D.G., Twining E., “Grid Connection Regulation of a Three-phase Voltage Source Inverter with an LCL Input Filter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, nº3, pp. 888 – 895, 2003.
- [4] Enslin J.H.R., Heskes P.J.M., “Harmonic Interaction between a Large Number of Distributed Power Inverters and the Distribution Network”, *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2003, IEEE 34<sup>th</sup> Annual*, Vol. 4, pp. 1742 – 1747.
- [5] Wang T.C.Y., Ye Z., Sinha G., Yuan X., “Output Filter Design for a Grid-interconnected Three-phase Inverter”, *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2003, IEEE 34<sup>th</sup> Annual*, Vol. 2, pp. 779 – 784.