



TÍTULO: ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE UM GRUPO MOTOR GERADOR (GMG) À REDE ELÉTRICA

Alunos: Marcelo Francisco Oliveira Rosa, Tayrine de Carvalho Lima; Prof. Orientador:
Dalmo Cardoso da Silva Júnior

Linha de pesquisa: Eletrônica de Potência e Controle Automático

RESUMO

Este projeto de pesquisa é uma contribuição ao estudo da modelagem e controle de um conversor estático fonte de tensão usado para conectar um sistema de geração de energia elétrica a partir de um grupo motor gerador. O principal objetivo é modelar o grupo motor gerador tal forma que permita investigar as características dinâmicas, a partir de variações de tensão e/ou frequência e modelar também o conversor eletrônico de interface CC-CA e a rede de distribuição. São apresentados estudos dos tipos e dos desempenhos de circuitos de sincronismo usados para sincronizar as tensões geradas pelos conversores estáticos com as tensões do sistema (rede elétrica), das técnicas de controle aplicadas a conversores fonte de tensão conectados em paralelo com a rede CA. Por fim, são apresentados os resultados de simulação que validam os modelos matemáticos adquiridos nos estudos.

Palavras-chave: Grupo motor gerador, Conversor fonte de tensão, modelagem e controle de conversores, eletrônica de potência.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica através de fontes alternativas de energia e a eficiência energética são assuntos que vêm se tornando muito assíduos no cenário

mundial. A busca por tecnologias eficientes e renováveis em termos de utilização da energia elétrica tem sido motivada por questões de natureza econômica e ambiental. Com isso, os custos de implementação dos sistemas que utilizam recursos renováveis, como a energia solar e a eólica, por exemplo, diminuíram nos últimos anos devido à tecnologia e aos avanços na produção da matéria primeira fundamental a esses processos. O interesse pela utilização das fontes renováveis na produção de energia elétrica tem sido impulsionado pela sempre crescente demanda de energia, pelo esgotamento dos combustíveis fósseis, pela baixa eficiência global e pela poluição causada pelas usinas convencionais.

Nesse cenário, encontra-se a geração eólica, que tradicionalmente, os geradores síncronos acionados por motor a diesel são utilizados como geração de emergência, também chamada de geração por “stand by”, isto é, no suprimento de energia em caso de interrupção do fornecimento da rede elétrica. Atualmente, devido ao crescente aumento da demanda por energia elétrica, esses geradores também têm sido frequentemente empregados para atender à demanda local em momentos de pico, operando em paralelo com a rede elétrica (“peak shaving”) ou isolado. O conjunto formado por um motor acoplado a um gerador é denominado “Grupo Motor Gerador” (GMG). A geração próxima às cargas, chamada de Geração Distribuída (GD), surgiu como uma alternativa para aliviar o fluxo de potência nas linhas transmissão, e com isso reduzir as perdas por efeito Joule, e para melhorar os níveis de qualidade e confiabilidade da energia elétrica fornecida. Devido às características intrínsecas dos motores a combustão, os geradores a diesel operam com considerável variação de frequência. Portanto, esses geradores não podem ser conectados diretamente à rede elétrica, necessitando de uma interface que sincronize o seu funcionamento com a rede. Neste sentido, os conversores eletrônicos de potência apresentam importante função para compatibilizar a operação dos geradores com os requisitos da rede, como também no controle do fluxo de potência ativa e reativa, na regulação de tensão, na redução de conteúdo harmônico, entre outros.

Um exemplo interessante ocorre em Fernando de Noronha, arquipélago brasileiro do Estado de Pernambuco, onde os grupos motores geradores diesel são, atualmente, as principais fontes de eletricidade. Apesar de serem usados, tradicionalmente, para alimentar cargas isoladas, nada impede que, com um controle adequado, o GMG seja conectado em paralelo com a rede elétrica de distribuição, fornecendo eletricidade para um pequeno grupo de consumidores comerciais ou

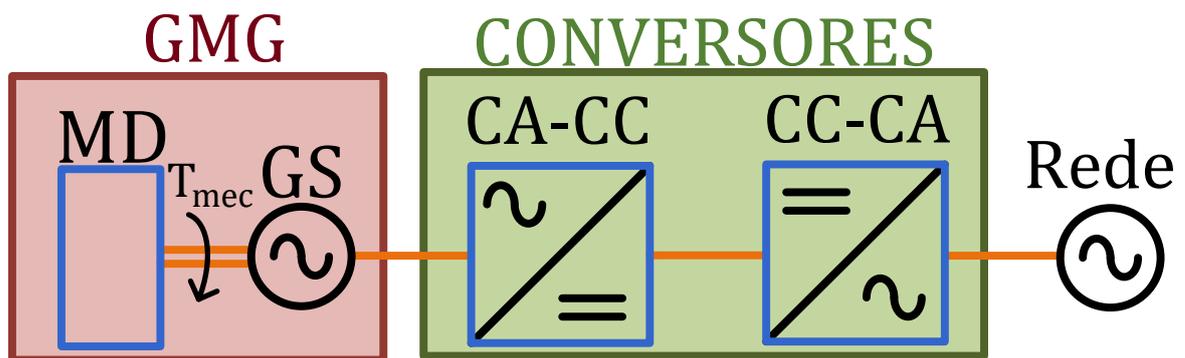
industriais, aumentando a oferta de energia e, reduzindo o pico de demanda da instalação ou região.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O DIESEL GERADOR CONECTADO À REDE (GMG)

Nas aplicações de GMG acionado por motores à combustão, os geradores síncronos são conectados diretamente ao eixo do motor diesel. No entanto, a inclusão dos conversores estáticos entre a rede elétrica e o GMG conforme mostrado na Figura 1, além de aumentar a controlabilidade para o sistema de geração, abre diversas oportunidades para a integração de fontes dessa natureza com a rede elétrica, se comparado com o modo de conexão direto.

Figura 1: Esquema de conexão do GMG à rede elétrica com conversores estáticos.



FONTE: O autor

Para a conexão de um GMG à rede elétrica foi utilizado os conversores CA-CC e CC-CA, também conhecidos como retificador e inversor, respectivamente. O esquema de conexão de um GMG à rede elétrica é observado na Figura 1. O conversor CA-CC utilizado foi baseado na topologia a diodos, isto é, não controlado. Já o conversor CC-CA utilizado foi a topologia trifásica, três fio, dois níveis e a sua estrutura será abordada na Seção 2.2.

2.2 CONVERSORES FONTE DE TENSÃO CC-CA

Os conversores CC-CA, também conhecidos como inversores, têm como função, converter a tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA, com amplitude e frequência desejada (RASHID, 2014). De acordo com AHMED (2000, p. 350), “Os inversores são circuitos estáticos (isto é, não têm partes móveis) que convertem potência CC em potência CA com a frequência e tensão ou corrente de saída desejada”.

Segundo RASHID (2014, p. 243),

A forma de onda da tensão de saída de um inversor ideal deve ser senoidal. Na prática, porém, ela não é senoidal e contém determinadas harmônicas. Para aplicações de baixa e média potência, tensões com onda quadrada ou quase quadrada podem ser aceitáveis, mas para aplicações de alta potência são necessárias formas de onda senoidais com baixa distorção. Com a disponibilidade de dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, os conteúdos harmônicos da tensão de saída podem ser significativamente minimizados ou reduzidos por meio de técnicas de chaveamento.

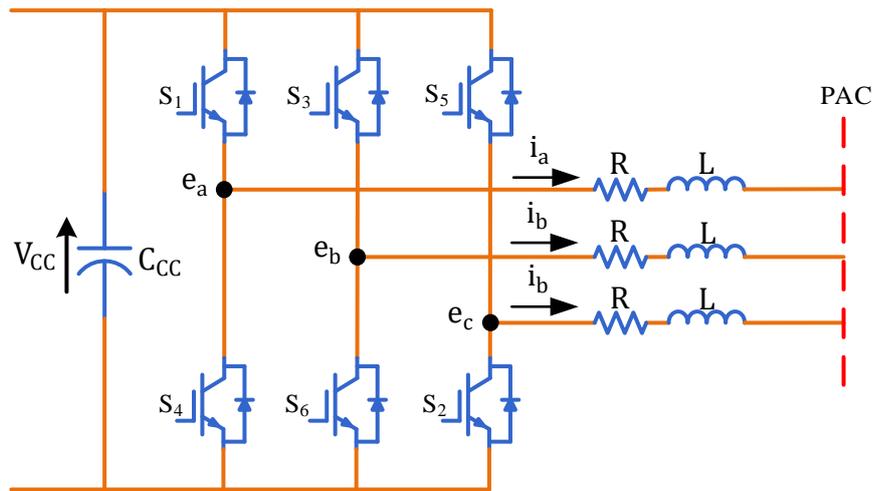
Os inversores podem ser monofásicos ou trifásicos. O último é o objetivo do presente trabalho. “A maioria das aplicações de inversores requerem algum modo de controle, seja por tensão e/ou por corrente da saída CA. Vários métodos usados para isso podem ser classificados em três grandes categorias” (AHMED, 2000, p. 363).

- Controle da tensão de entrada CC, fornecida para o inversor;
- Controle da tensão de saída CA do inversor;
- Controle da corrente de saída do inversor. (objetivo do trabalho)

“O circuito do inversor trifásico muda a tensão de entrada CC para uma tensão de saída variável trifásica de frequência desejável. A tensão CC pode ser obtida de uma fonte CC (renovável em sua grande maioria) ou de uma tensão CA retificada” (AHMED, 2000, p. 376). No presente trabalho, o inversor trifásico recebe tensão CC retificada (retificador trifásico) do grupo motor gerador.

Em aplicações de alta potência, como as redes de distribuição, normalmente, utilizam-se os inversores trifásicos. O presente trabalho utilizou um inversor trifásico estático controlado no modo de corrente, constituído de seis dispositivos chaveados, sendo dois desses para cada braço ou dois por cada fase (Figura 2).

Figura 2: Conversor CC-CA trifásico, três fios e dois níveis.



FONTE: O autor

“A modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*, PWM) é o método mais comum para controlar a tensão e ou a corrente de saída do conversor. Nela, a tensão de saída é uma onda modulada por largura de pulso, controlada pela variação da duração dos pulsos” (AHMED, 2000, p. 365).

Segundo RASHID (2004), o controle de tensão (ou modulação) dos inversores podem ser: modulação por largura de pulso, modulação trapezoidal, modulação escada, modulação degrau, modulação por injeção harmônica e modulação por delta.

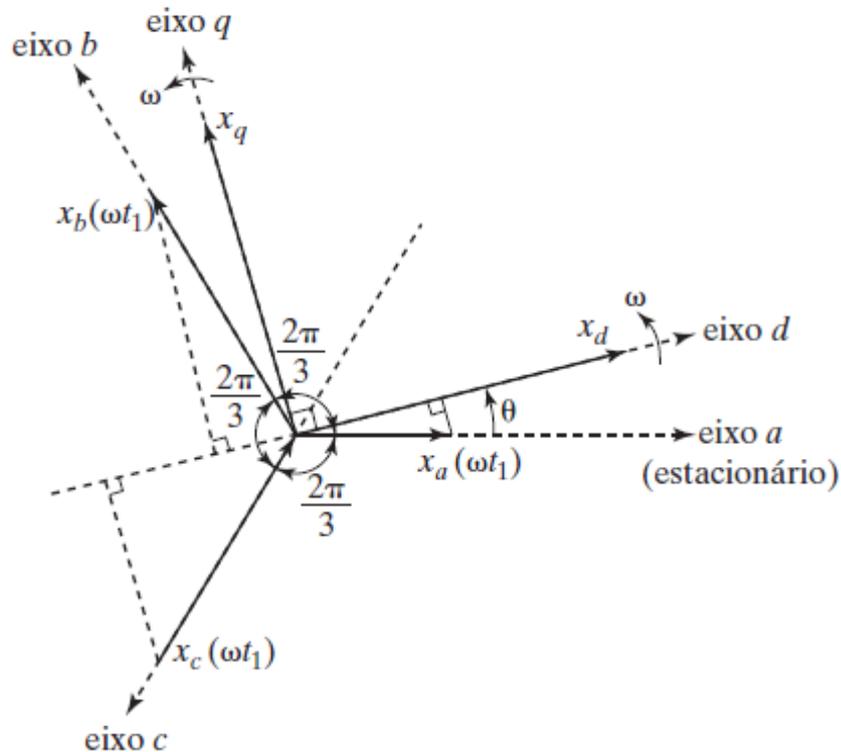
O presente trabalho utilizou a modulação por largura de pulso. O objetivo da modulação, além de controlar a corrente de saída, é eliminar ou reduzir os conteúdos harmônicos.

2.3 TRANSFORMADA DE PARK

Para simplificar a análise da conversão de energia no inversor trifásico, ou seja, transformar o sistema trifásico estacionário (coordenadas naturais) em bifásico síncrono, existem dois métodos: transformada d-q (sistema de coordenadas síncronas em eixo direto e quadratura) e a transformada α - β (bifásico estacionário). Essa pesquisa utilizou a transformada d-q, também conhecida como transformada de Park.

Conforme RASHID (2014, p. 833), “as variáveis trifásicas no sistema estacionário abc, podem ser transformadas em variáveis bifásicas em um sistema de referência rotativo definido pelos eixos d (direto) e q (quadratura) perpendiculares entre si”, conforme a Figura 3.

Figura 3. Sistema abc para o sistema dq.



FONTE: RASHID, 2014

Segundo RASHID (2014, p. 834), “A transformação das variáveis abc para o sistema dq é conhecido como abc/dq, e pode ser expressa na forma matricial” como em (3).

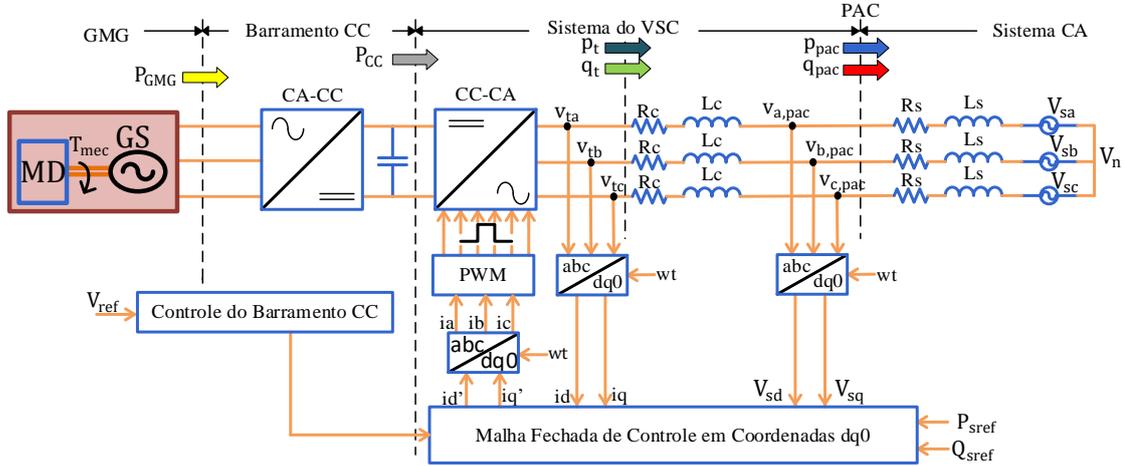
$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - 2\pi/3) & -\text{sen}(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 METODOLOGIA

Na operação do conversor fonte de tensão, (do inglês, *Voltage-Sourced Converter*, VSC) existe a possibilidade de controle da potência ativa e reativa que fluem pelo VSC. Uma das estratégias utilizadas é conhecida como controle no modo de corrente (do inglês, *Current-Mode Control*, CMC). Neste modo, as potências injetadas na rede elétrica são controladas pela amplitude e fase das correntes sintetizadas em relação à tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Este modo

de controle será estudado nesta seção. A modelagem foi baseada em Yazdani e Iravani (2010).

Figura 4: Visão geral do controlador de corrente associado à rede elétrica



FONTE: O autor

De acordo com a Figura 4, observa-se que a dinâmica do lado CA é determinada conforme as equações abaixo:

$$L_f \frac{di_a}{dt} = -R_f i_a + V_{ta} - V_{sa} \quad (4)$$

$$L_f \frac{di_b}{dt} = -R_f i_b + V_{tb} - V_{sb} \quad (5)$$

$$L_f \frac{di_c}{dt} = -R_f i_c + V_{tc} - V_{sc} \quad (6)$$

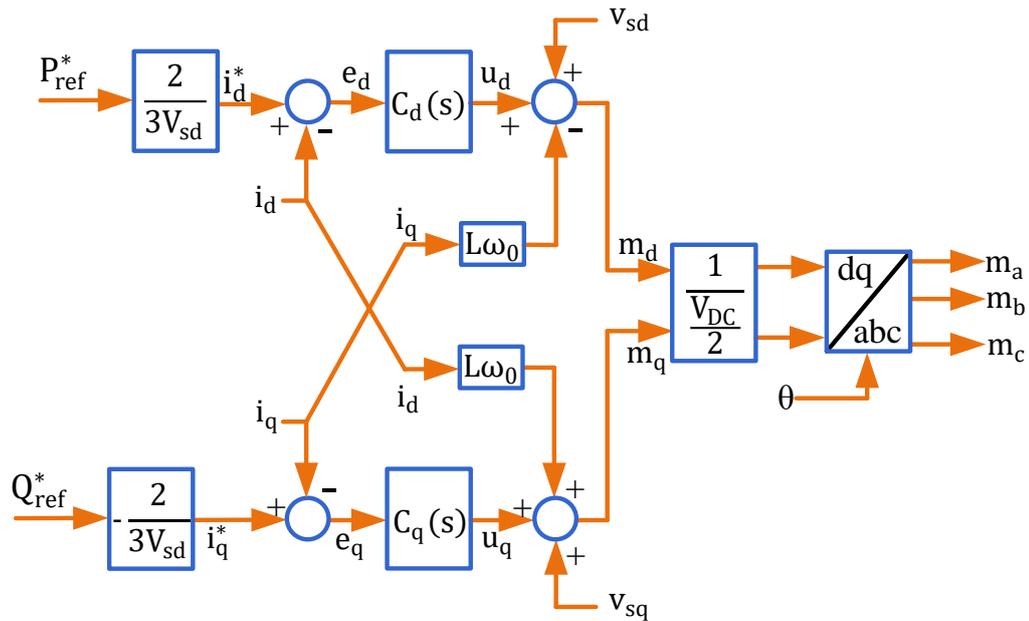
Aplicando a transformada de Park em (4), (5) e (6) e assumindo condições de estado permanente, tem-se em (7) e (8) a dinâmica do lado CA no sistema de coordenadas dq .

$$L_f \frac{di_d}{dt} = L_f \omega_0 i_q - R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (7)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = L_f \omega_0 i_d - R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (8)$$

A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle da corrente no sistema de coordenadas síncrono. Pode-se observar que o acoplamento entre i_{sd} e i_{sq} é eliminado pela compensação *feed-forward* de desacoplamento.

Figura 5: Diagrama de blocos do sistema de controle de corrente



FONTE: O autor

Após aplicar o desacoplamento das dinâmicas dos eixos d e q , pode-se considerar o sistema expresso por:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (9)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (10)$$

Conforme (9) e (10), observa-se que há uma relação entre as tensões de saída do inversor e da rede elétrica. A primeira, (V_t) é modelada como a entrada de controle, já a segunda, (V_s), como um distúrbio. A fim de simplificar o equacionamento, essa relação pode ser modelada como uma única ação de controle, u_d para (11) e u_q para (12), resultando em:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + u_d \quad (11)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + u_q \quad (12)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace em (11) e (12), tem-se

$$L_f i_d s = -R_f i_d + u_d \quad (13)$$

$$L_f i_q s = -R_f i_q + u_q \quad (14)$$

Nesse caso, a função de transferência do sistema pode ser expressa por:

$$\frac{i_d}{u_d} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (15)$$

$$\frac{i_q}{u_q} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (16)$$

Para esse sistema, tem-se a malha simplificada de controle no sistema de coordenadas síncrono dq . Pode-se perceber que o comportamento das componentes dq é idêntico, possibilitando, portanto, o projeto do controlador em apenas um eixo, mas os mesmos ganhos serão aplicados em ambas as malhas de controle.

Sabe-se também que quando se utiliza a transformada de Park, suas componentes passam a possuir um comportamento estacionário no tempo, vez que esse sistema é de coordenadas girantes. Com isso, as correntes i_d e i_q nas respectivas malhas de controle devem seguir referências constantes, o que permite o uso de um controlador PI, de acordo com o princípio do modelo interno.

A função de transferência característica do controlador PI pode ser escrita como:

$$C(s) = \frac{K_{p,i} s + K_{i,i}}{s} \quad (17)$$

em que $K_{p,i}$ e $K_{i,i}$ são os ganhos proporcional e integral do controlador PI da malha de controle da corrente.

Sendo assim, considerando apenas a dinâmica em componente d , a multiplicação de (15) por (17) fornece a função de transferência em malha aberta do controle de corrente, conforme a seguir:

$$M_{a,i}(s) = \left(\frac{K_{p,i}}{L_f s} \right) \frac{s + \frac{K_{i,i}}{K_{p,i}}}{s + \frac{R_f}{L_f}} \quad (18)$$

É possível observar em (18) que o sistema possui um polo em $s = -R_f/L_f$. Pela técnica de cancelamento de polos e zeros, o zero do controlador PI, ou seja, $s = -K_{i,i}/K_{p,i}$ deve estar situado em cima do polo da função de transferência. Assim, estabelece-se a relação:

$$\frac{K_{i,i}}{K_{p,i}} = \frac{R_f}{L_f} \quad (19)$$

Com isso, é fácil perceber que a função de transferência em malha aberta da planta de controle se transforma em:

$$M_{a,i}(s) = \frac{K_{p,i}}{L_f s} \quad (20)$$

E a função de transferência em malha fechada é dada por:

$$M_{f,i}(s) = \frac{1}{\frac{L_f}{K_{p,i}} s + 1} \quad (21)$$

Como observado em (21), a função de transferência é de primeira ordem. Sabe-se que função de transferência de um sistema de primeira ordem é apresentada conforme a seguir:

$$M_f(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (22)$$

em que τ_i é a constante de tempo do sistema em (s).

Sendo assim, comparando (21) e (22), pode-se determinar o valor de $K_{p,i}$:

$$K_{p,i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (23)$$

E substituindo (23) em (19), é possível determinar o valor de $K_{i,i}$:

$$K_{i,i} = \frac{R_f}{\tau_i} \quad (24)$$

Yazdani e Iravani (2010) sugerem que a constante de tempo deve ser $0,5 \text{ ms} \leq \tau_i \leq 5 \text{ ms}$ para sistemas cuja frequência fundamental é $f = 60 \text{ Hz}$. Assumindo, então, uma constante de tempo $\tau_i = 1 \text{ ms}$ e, conforme já mencionado, $R_f = 0,5 \Omega$ e $L_f = 1 \text{ mH}$, tem-se os seguintes parâmetros do controlador de corrente:

Tabela 1: Parâmetros

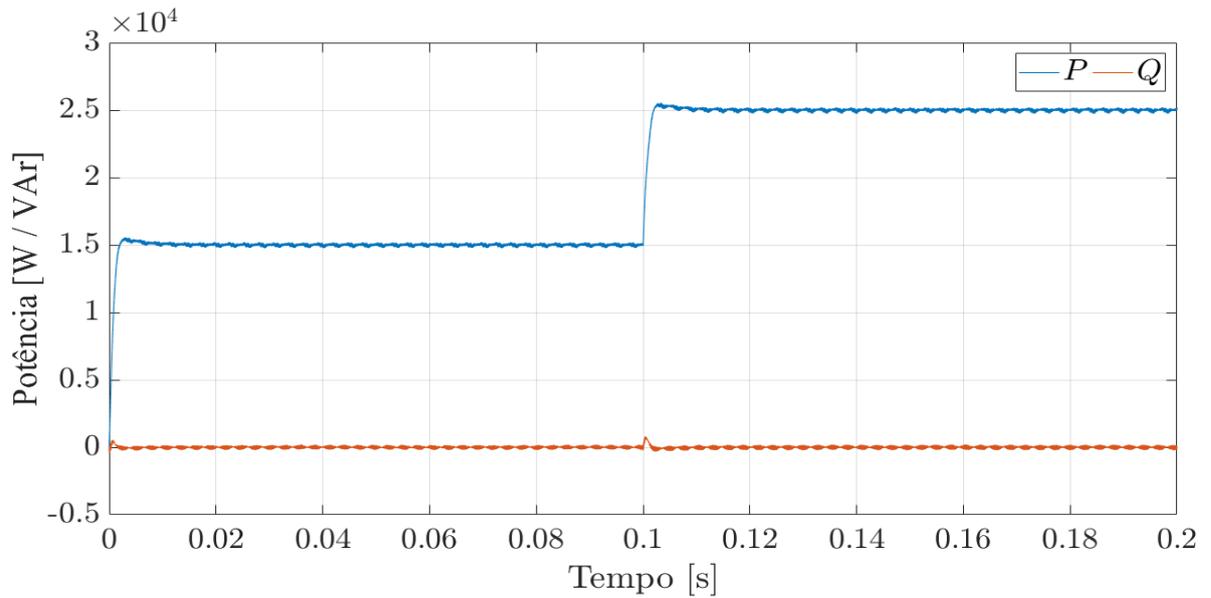
Parâmetro	Valor
$K_{p,i}$	1 H/s
$K_{i,i}$	50 Ω/s

Fonte: O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

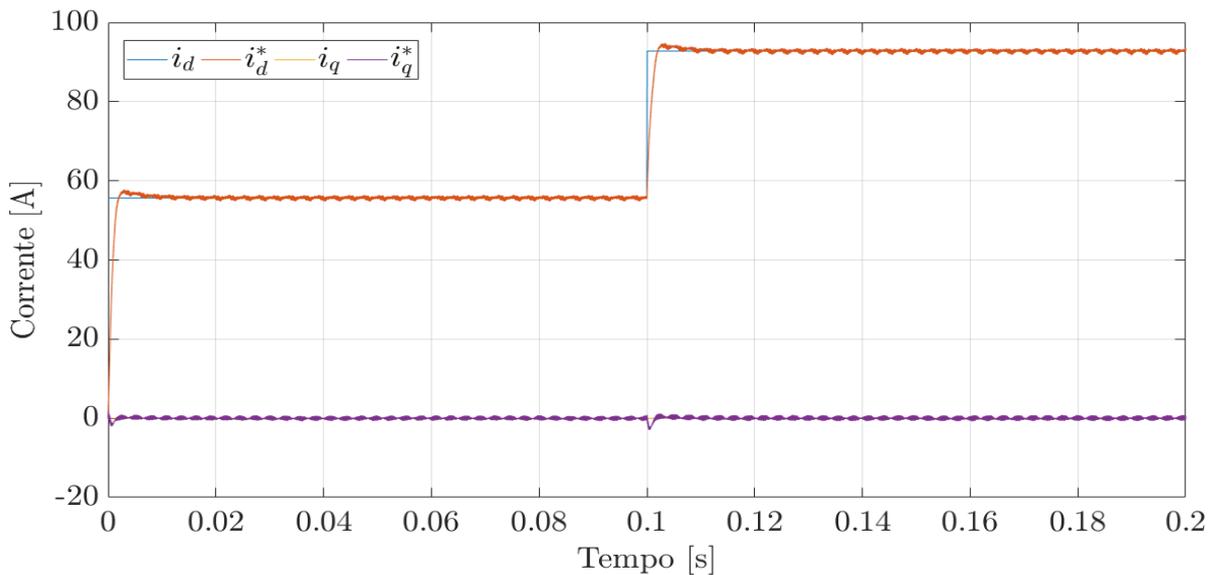
De acordo com o controlador de corrente apresentado na seção de metodologia, e simulado no *software* MatLab/Simulink, obtêm-se os resultados expostos nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6: Gráfico de Potência Ativa P e Potência Reativa Q *versus* Tempo.



FONTE: O autor

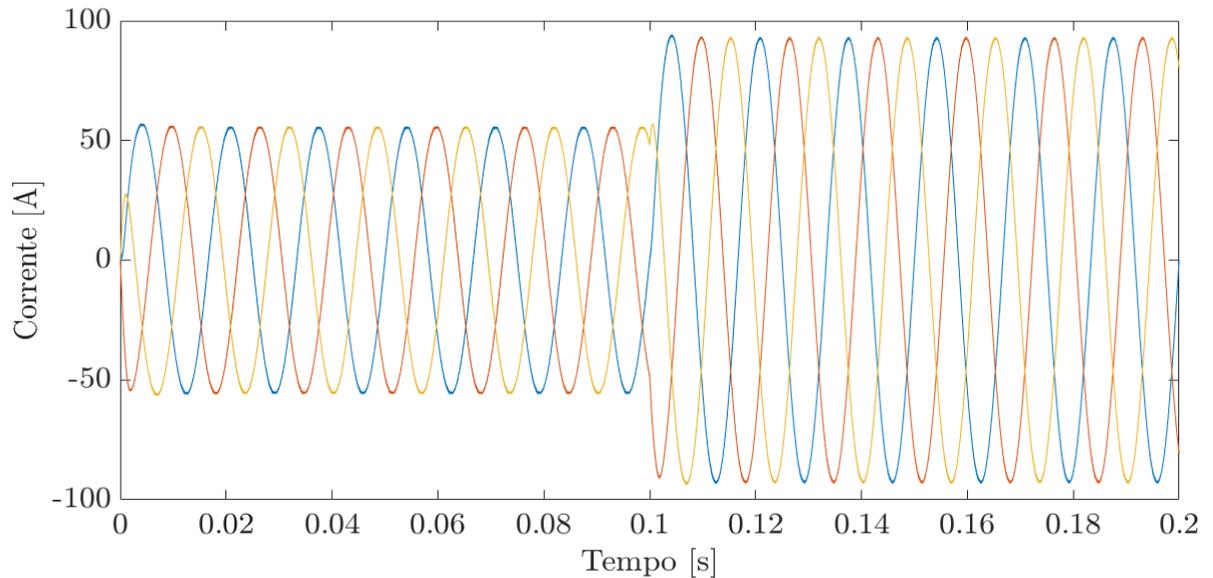
Figura 7: Gráfico de corrente direta i_d e corrente quadratura i_q versus Tempo.



FONTE: O autor

Com o aumento da intensidade da corrente injetada, conforme a Figura 8, no controlador de corrente, observa-se nas figuras anteriores, que a potência ativa e a corrente direta aumentam proporcionalmente, ao contrário da potência reativa e da corrente quadratura, que permanecem invariável, evidenciando a eficiência do controlador de corrente.

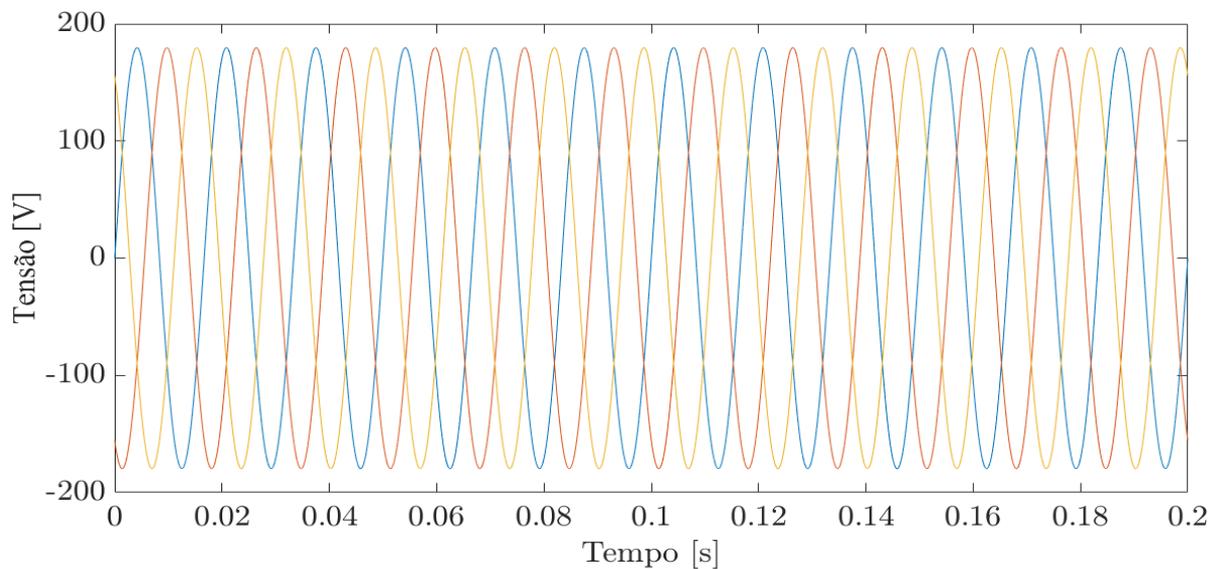
Figura 8: Gráfico da Corrente trifásica *versus* Tempo.



FONTE: O autor

Eficiência percebida do controlador de corrente, pois a potência reativa praticamente não variou, portanto, as componentes harmônicas, ruídos e interferências eletromagnéticas estão sendo “rejeitadas”. Esses três parâmetros são os maiores responsáveis por sobreaquecerem o sistema e diminuir a eficiência. A título de informação, pode-se observar a Figura 9, onde estão expostas as curvas de tensão trifásica CA no ponto de acoplamento comum. Observa-se que a tensão é trifásica, senoidal e balanceada, indicando a qualidade da energia local.

Figura 9: Gráfico da Corrente trifásica *versus* Tempo.



FONTE: O autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos, conclui-se a eficácia dos controladores de corrente e do arquivo de simulação do modelo do grupo motor gerador através do *software* MatLab/Simulink.

Ressalta-se a importância do controlador de corrente, juntamente com o inversor, para conversão CC em AC, entre o grupo motor gerador e a rede elétrica de distribuição, pois o grupo motor gerador fornece tensão e corrente em CA, e a rede elétrica é de característica alternada.

O presente trabalho poderá ser utilizado como fonte de consulta aos estudantes e profissionais para levar adiante a pesquisa do respectivo trabalho, bem como, aprimorá-lo.

ABSTRACT

This research project is a contribution to the study of the modeling and control of a static voltage source converter used to connect an electricity generation system from a generator set. The main objective is to model the generator motor group in such a way that it allows investigating the dynamic characteristics, from variations in voltage and / or frequency and also modeling the electronic converter of the CC-AC interface and the distribution network. Studies of the performance of the synchronism circuit used to synchronize the voltages generated by the static converters with the system voltages (mains) are presented, of the control techniques applied to voltage source converters connected in parallel with the AC network. Finally, the simulation results that validate the mathematical models acquired in the studies are presented.

Key words: Generator motor group, Voltage source converter, modeling and control of converters, power electronics.

REFERÊNCIAS

CHAKRABORTY, S.; SIMÕES, M. G.; KRAMER, W. E. **Power electronics for renewable and distributed energy systems**. A Sourcebook of Topologies, Control and Integration, Springer, p. 235-265, 2013.

FOGLI, G. A. et al. **Integração de um grupo motor gerador diesel em uma rede secundária de distribuição através de um conversor estático fonte de tensão**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2014.

FERREIRA, R. A. F. et al. **Controle de microrredes cc baseado em droop adaptativo de tensão - simulação em tempo real com control-hardware-in-loop.** Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2015.

ALMEIDA, P. M. d. et al. **Contribuições ao estudo de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica sem filtros passivos: projeto de controladores digitais para redução do conteúdo harmônico.** Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2013.

MUSSE, B. F. et al. **Real time simulation of pv system integration to the distribution grid using dynamic load model.** In: IEEE. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2017 IEEE 8th International Symposium on. 2017. p. 1-6.

RANAWEERA, I.; SANCHEZ, S.; MIDTGÅRD, O.-M. **Residential photovoltaic and battery energy system with grid support functionalities.** In: IEEE. 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 2015. p. 1-7.

ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. **Power electronics for renewable energy systems, transportation, and industrial applications.**: John Wiley & Sons, 2014.

SHUVRA, M. A.; CHOWDHURY, B. H. **Autonomous control of smart inverters in grid connected and islanded mode.** In: IEEE. Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017 IEEE. 2017. p. 1-5.

MALEKPOUR, A. R.; PAHWA, A. **A dynamic operational scheme for residential pv smart inverters.** IEEE Transactions on Smart Grid, IEEE, 2017.

BELL, F. et al. **Secondary voltage and reactive power support via smart inverters on a high penetration distributed photovoltaic circuit.** In: IEEE. Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2016 IEEE Power & Energy Society. 2016. p. 1-6.