

MODELAGEM, ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO CONTROLE A PWM PARA INVERSORES TRIFÁSICOS SOB CONDIÇÕES DESEQUILIBRADAS

Vitória Ellen da Silva Sousa¹, Adriano Aron Freitas de Moura², Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo^{1,2}, Ednardo Pereira da Rocha^{1,3}

¹Estudante de graduação de engenharia elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil (vitoriaellendasousa@gmail.com)

²Professor de graduação de engenharia elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil

^{1,2}Professor de graduação de engenharia elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Caraúbas, Brasil

^{1,3}Professor de graduação de engenharia elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta a modelagem e a análise de estabilidade de um sistema de controle vetorial em referencial síncrono d-q aplicado a uma planta elétrica. A estrutura de controle emprega controladores Proporcional-Integral (PI) associados a um Filtro Rejeita-Faixa (*Notch Filter* – NF) para o tratamento de sinais e mitigação de perturbações. Após a dedução da função de transferência em malha fechada, aplicou-se o critério de Routh-Hurwitz para a determinação das regiões de estabilidade. Os resultados analíticos estabeleceram que, para assegurar a estabilidade do sistema, os parâmetros de ganho devem satisfazer as condições $K_i > 0$ e $K_p > -0,00075$.

Palavras-chave: Controle Vetorial Síncrono d-q; Controlador PI; Filtro Notch; Função de Transferência; Critério de Estabilidade de Hurwitz.

INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização do sistema de coordenadas de referência síncrona (d-q) consolidou-se como o padrão para o controle preciso de sistemas elétricos. Contudo, conforme demonstrado por Alves (2021), a estabilidade e a precisão do fluxo de potência em regime permanente dependem diretamente da modelagem rigorosa dos reguladores de velocidade dos geradores.

Essa análise torna-se fundamental dado que o comportamento da rede sob estresse pode apresentar múltiplas soluções de fluxo de potência, comprometendo a margem de segurança do sistema (SOUZA, 2021).

Nesse cenário, o presente trabalho descreve as etapas da modelagem integral do sistema, abrangendo desde a obtenção da função de transferência da planta elétrica até a inclusão de filtros para o tratamento de sinais. Para além da dedução matemática, o objetivo central reside na determinação dos limites operacionais de estabilidade, visto que a precisão dessas fronteiras exige a inclusão rigorosa dos

modelos de regulação e controle nas formulações do sistema (Alves, 2021).

O controle vetorial em sistemas de coordenadas de referência síncrona (d-q) consolidou-se como a técnica padrão para o acionamento de máquinas e conversores elétricos (BOSE, 2006). No entanto, a eficácia dessa abordagem depende da correta sintonização dos controladores para garantir a robustez do sistema frente a distúrbios.

Nesse contexto, a análise da estabilidade absoluta é realizada através do Critério de Routh-Hurwitz, o qual permite determinar a estabilidade da malha fechada sem a necessidade de calcular explicitamente as raízes da equação característica (OGATA, 2010). Tal fundamentação teórica é essencial para nortear a seleção dos ganhos proporcional e integral, assegurando um desempenho dinâmico adequado e a mitigação de oscilações indesejadas ou instabilidades operacionais.

Tal abordagem possibilita o controle independente de torque e fluxo, assemelhando-se ao comportamento

dinâmico de sistemas de corrente contínua. Para viabilizar esse controle, a literatura consagra o uso de controladores Proporcional-Integral (PI) devido à sua simplicidade, eficácia e facilidade de ajuste em malhas lineares (OGATA, 2010).

Todavia, sistemas reais estão frequentemente sujeitos a perturbações em frequências específicas, o que demanda a integração de Filtros Rejeita-Faixa (*Notch Filters* – NF) à malha de controle para assegurar a integridade dos sinais (DORF; BISHOP, 2018).

Diante dessa necessidade de filtragem, este trabalho apresenta a modelagem de uma planta elétrica de primeira ordem inserida em uma estrutura de controle vetorial. A motivação central reside em compreender como a interação dinâmica entre o controlador, o filtro e os parâmetros físicos da planta, especificamente a indutância e a resistência, afeta a estabilidade global do sistema. Tal análise é crucial para evitar oscilações indesejadas que possam comprometer a integridade do hardware (OGATA, 2010).

Os principais objetivos deste trabalho consistem em modelar matematicamente a função de transferência em malha fechada de um inversor trifásico acoplado à rede elétrica, incorporando Filtros Rejeita-Faixa (*Notch Filters* – NF) para analisar sua estabilidade sob condições de tensões desequilibradas.

Para tanto, a estratégia de controle avaliada integra controladores PI a esses filtros, visando especificamente a mitigação de oscilações de dupla frequência características de sistemas desbalanceados. Por fim, utiliza-se o critério de Routh-Hurwitz para determinar os limites operacionais dos ganhos K_p e K_i , assegurando, assim, uma resposta estável, robusta e adequada aos requisitos do sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

As metodologias empregadas para o alcance dos objetivos propostos consistem na modelagem e no projeto de um controle vetorial em referencial síncrono (d-q), utilizando controladores Proporcional-Integral (PI) em cada eixo de coordenadas. A adoção dessa estrutura fundamenta-se na capacidade de representação precisa das variáveis de estado do sistema em regime permanente, conforme discutido em formulações de fluxo de potência trifásico (ALVES, 2021).

A ocorrência de desequilíbrios na rede elétrica ou em cargas assimétricas introduz componentes de sequência negativa que degradam o desempenho de

inversores trifásicos operando no referencial síncrono (d-q). De acordo com (RODRIGUEZ, 2007), a interação entre os vetores de sequência positiva e negativa resulta no surgimento de oscilações pulsantes com frequência dupla nas correntes e tensões transformadas.

Como os controladores Proporcional-Integral (PI) convencionais possuem ganho finito em frequências senoidais e são projetados para atuar sobre grandezas contínuas (CC), a presença desses componentes de frequência dupla impede a anulação do erro em regime permanente (TEODORESCU, 2011).

De acordo com (LISERRE, 2007), a interação entre os vetores de sequência positiva e negativa resulta no surgimento de oscilações pulsantes com frequência de nas correntes e tensões transformadas. Como os controladores Proporcional-Integral (PI) convencionais possuem ganho finito em frequências senoidais e são projetados para atuar sobre grandezas contínuas (CC), a presença desses componentes de frequência dupla impede a anulação do erro em regime permanente (RODRIGUEZ, 2007). Esse fenômeno compromete a estabilidade da malha de controle e induz distorções harmônicas na corrente de saída.

Uma estratégia comum para mitigar essas oscilações consiste na inserção de filtros rejeita-faixa (*notch filters*) sintonizados em frequência dupla nas malhas de realimentação. Segundo (YAZDANI, 2010), essa técnica permite isolar a componente fundamental de sequência positiva, possibilitando que o controlador PI opere de forma eficaz.

No entanto, o uso desses filtros impõe um compromisso de projeto: embora eliminem o ripple de corrente, eles introduzem atraso de fase e limitam a largura de banda (BW) do sistema de controle (FREIJEDO, 2011). Portanto, a sintonia deve ser rigorosa para garantir a robustez do inversor frente a variações dinâmicas da rede.

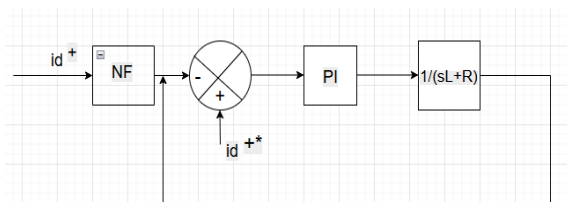


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema de controle vetorial síncrono d-q.

A partir da análise do diagrama do sistema, ilustrado na Figura 1, obtém-se a equação da planta para o controlador PI. Esta representação matemática consiste em uma aproximação idealizada, expressa



pela função de transferência apresentada na Equação (1).

$$G_p(s) = \frac{1}{sL+R} \quad (1)$$

A partir da planta supracitada, desenvolveu-se a modelagem matemática do sistema para descrever seu comportamento dinâmico. Tal representação, sob a forma de função de transferência, é apresentada na Equação (2):

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2)$$

Considerando a função de transferência Filtro Notch (NF) a Equação (3):

$$NF(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + BWs + \omega_n^2} \quad (3)$$

Atribuindo alguns parâmetros a Equação (3), como a largura de banda e frequência angular:

$$NF(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + 2510,32741 s + \omega_n^2}, \quad \omega_n = 2 \pi \cdot 60 \cdot 2 \quad (4)$$

A partir da análise do diagrama de blocos apresentado na Figura 1, a função de transferência do controlador é deduzida como:

$$- NF id^+ PI \left(\frac{L}{sL+R} \right) + id^{+*} PI \left(\frac{L}{sL+R} \right) = id^+ NF \quad (5)$$

Fazendo alguns ajustes na equação, a estrutura final a equação será:

$$\frac{I_d^+}{I_d^{+*}} = \frac{PI \cdot \frac{1}{sL+R}}{NF \left[1 + PI \cdot \frac{1}{sL+R} \right]} \quad (6)$$

Sendo o numerador direito:

$$N(s) = \frac{K_p s + K_i}{s(Ls+R)} \quad (7)$$

E sendo o denominador:

$$D(s) = NF(s) \left(\frac{K_p s + K_i}{s(Ls+R)} + 1 \right) \quad (8)$$

Logo:

$$\frac{I_d^+}{I_d^{+*}} = \frac{K_p s + K_i}{s(Ls+R) NF(s) \left(\frac{K_p s + K_i}{s(Ls+R)} + 1 \right)} \quad (9)$$

Multiplicando o denominador interno:

$$1 + \frac{K_p s + K_i}{s(Ls+R)} = \frac{s(Ls+R) + (K_p s + K_i)}{s(Ls+R)} \quad (10)$$

Substituindo:

$$\frac{I_d^+}{I_d^{+*}} = \frac{K_p s + K_i}{NF(s) [s(Ls+R) + (K_p s + K_i)]} \quad (11)$$

Função de transferência final:

$$\frac{I_d^+}{I_d^{+*}}(s) = \frac{K_p s + K_i}{NF(s) [Ls^2 + Rs + K_p s + K_i]} \quad (12)$$

Calculando BW para o filtro rejeita-faixa e considerando $L = 1,73 \times 10^{-3}$ e $R = 7,3 \times 10^{-4}$, obtém-se:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot 120 = 753,6 \text{ rad/s} \quad (13)$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{753,6 \cdot 1,73 \times 10^{-3}}{7,3 \times 10^{-4}} = 300,19 \times 10^{-3} \quad (14)$$

$$BW = \frac{\omega_0}{Q} = 2510,32741 \text{ rad/s} \quad (15)$$

calculado BW, substituímos na Equação (3) e temos:

$$NF(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + 2510,32741 s + \omega_n^2} \quad (14)$$

A aplicação do critério de estabilidade de Routh-Hurwitz constitui um método algébrico fundamental para determinar a estabilidade absoluta de sistemas lineares invariantes no tempo (LTI) (OGATA, 2010). Esta ferramenta permite verificar a estabilidade do sistema sem a necessidade de calcular explicitamente as raízes da equação característica, consolidando-se como um recurso essencial na análise de sistemas de controle.

A principal vantagem deste critério reside na possibilidade de determinar a estabilidade do sistema estritamente pela análise dos coeficientes da equação característica. Tal característica é particularmente relevante para polinômios de ordem igual ou superior a três, nos quais o cálculo analítico das raízes torna-se complexo (DORF; BISHOP, 2018).

Assim, para a delimitação das regiões de estabilidade da função de transferência do controlador PI, empregou-se o método de Routh-Hurwitz. Este método consiste na análise do polinômio denominador da função de transferência do sistema em questão. A partir da equação característica, constrói-se uma tabela para a verificação das condições de estabilidade (OGATA, 2010).

O preenchimento das duas primeiras linhas da tabela é realizado com os coeficientes do polinômio característico, alternando-os entre as potências pares e ímpares (OGATA, 2010). Os elementos das linhas subsequentes são obtidos por meio do cálculo do determinante das linhas superiores, com sinal



invertido, sendo o resultado dividido pelo primeiro elemento da linha imediatamente anterior.

Tabela 1. Tabela do critério de Routh-Hurwitz.

Potência	Coluna 1 (pivôs)	Coluna 2	Coluna 3
s^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}
s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}
s^{n-2}	b_1	b_2	...
s^{n-3}	c_1	c_2	...

Os elementos das linhas seguintes são calculados usando o determinante das linhas acima com sinal trocado e dividido pelo primeiro elemento da linha anterior,

$$b_1 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-2} - a_n \cdot a_{n-3}}{a_{n-1}} \quad (15)$$

Calculando c_1 de modo semelhante, temos:

$$c_1 = \frac{b_1 \cdot a_{n-3} - a_{n-1} \cdot b_2}{b_1} \quad (16)$$

O sistema é classificado como estável se todos os elementos da primeira coluna tiverem o mesmo sinal. Se houver mudança de sinal, o sistema é instável e com isso o número de mudanças de sinal é igual ao número de raízes instáveis no lado direito do plano.

Geralmente o critério de Routh-Hurwitz é utilizado em sistemas lineares LTI (*Linear Time-Invariant*), um sistema que possui duas propriedades fundamentais que facilitam muito a análise matemática no campo da engenharia: a Linearidade e a Invariância no Tempo, podendo ser aplicado em modelos descritos por funções de transferência (ALVES, 2021).

Outra aplicação deste critério é na análise de Malha Fechada, sistema com realimentação, para verificar se o sistema realimentado vai oscilar ou divergir. Do ponto de vista desta aplicação, obtemos a equação característica para um sistema com uma planta $G(s)$ (OGATA, 2010), expressa como:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1+G(s) \cdot H(s)} \quad (17)$$

A equação característica da função de transferência $T(s)$ é obtida ao igualar o seu denominador a zero. A partir do polinômio resultante, constrói-se a tabela de Routh e analisa-se a sua primeira coluna. Para garantir a estabilidade do sistema e evitar a divergência, é necessário que todos os coeficientes da primeira coluna apresentem o mesmo sinal, tipicamente positivo (DORF; BISHOP, 2018).

A ocorrência de mudanças de sinal indica a existência de pólos no semiplano direito do plano complexo, o que resulta em uma resposta divergente. Adicionalmente, a estabilidade marginal, caracterizada por oscilações sustentadas, é verificada quando uma linha completa da tabela é composta por zeros (SOUZA, 2021).

Tal condição sinaliza a presença de raízes sobre o eixo imaginário, indicando que o sistema não diverge, porém mantém um regime oscilatório permanente. Por último, o método permite encontrar o Ganho Crítico; muitas vezes, o controlador tem um ganho variável e o critério de Routh possibilita descobrir até que valor de ganho K o sistema permanece estável (OGATA, 2010).

Outra aplicação do critério de Routh-Hurwitz é em projetos de controladores, sendo usado para descobrir qual a faixa de valores para os ganhos K_p e K_i e que asseguram a estabilidade operacional do sistema, em conformidade com as especificações de projeto (ALVES, 2021).

Para validar a modelagem proposta e os limites de estabilidade calculados, a próxima seção detalha os procedimentos metodológicos e as ferramentas computacionais empregadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da resposta dinâmica de inversores sob controle a variações assimétricas é comumente realizada via ferramentas de transitórios eletromagnéticos, como o ATPDraw, que permite modelar com precisão o impacto de degraus desequilibrados nos algoritmos de proteção (PREECE et al., 2016).

A simulação no software ATPDraw da resposta de um inversor com controle dq0 a um degrau desequilibrado analisa o comportamento dinâmico do equipamento frente a variações súbitas e assimétricas nas tensões ou correntes da rede.

Devido à elevada densidade de circuitos internos, o modelo no ATPDraw divide-se em subcircuitos para facilitar a análise, apresentados nas Figuras 2 e 3.

A Figura 2 apresenta o subcircuito base para a simulação do controle dq0. Este sistema processa a resposta ao degrau desequilibrado, realizando a conversão da corrente contínua da fonte (à esquerda) em corrente alternada para a carga (à direita).

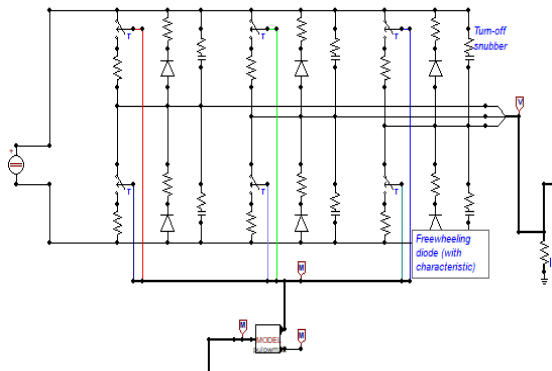


Figura 2: Subcircuito 1 do sistema para a simulação do controle síncrono d-q.

O circuito da Figura 2 é composto por uma ponte inversora de seis chaves com diodos de livre-circulação e circuitos *snubber* para proteção contra surtos de tensão. A regulação é realizada por um bloco MODELS que executa as equações dq0, enviando sinais de comando para a saída, onde sensores monitoram as tensões e correntes da carga.

A segunda etapa do sistema, ilustrada na Figura 3, foca no processamento de sinais e controle dinâmico. Utilizam-se blocos de transformação de coordenadas e sincronismo via PLL para decompor as grandezas elétricas em componentes simétricos. Esses sinais, após filtragem de harmônicos, alimentam o bloco MODELS, que executa o algoritmo de controle dq0 para compensar o desequilíbrio e regular a potência injetada na carga.

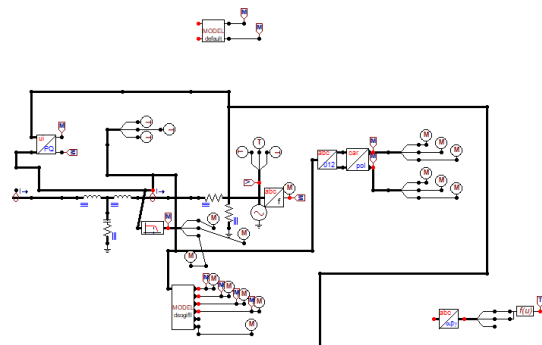


Figura 3: Subcircuito 2 do sistema para a simulação do controle síncrono d-q.

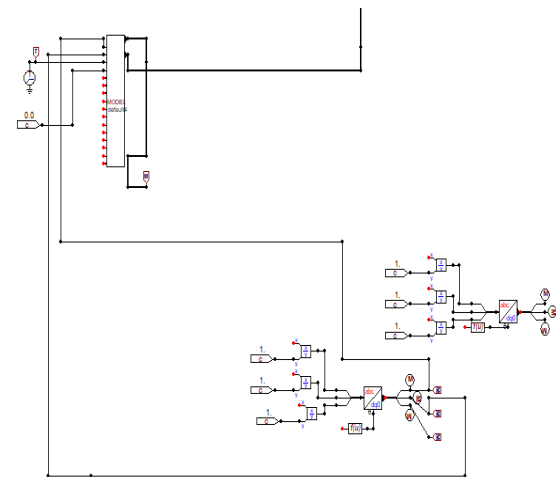


Figura 4: Subcircuito 3 do sistema para a simulação do controle síncrono d-q.

Terceira etapa da simulação estabelece as referências de operação e realiza a conversão das grandezas para o referencial síncrono. Através de blocos de constantes e divisores, definem-se os *setpoints* do sistema, enquanto o bloco MODELS coordena a temporização dos sinais de teste. Essa estrutura possibilita o monitoramento das componentes de eixo direto e quadratura via medidores de sinal, permitindo analisar com precisão o impacto do degrau desequilibrado sobre as variáveis de controle.

A quarta parte da simulação detalha a implementação da estratégia dq0 via decomposição vetorial dupla. Utilizam-se transformações $abc \rightarrow dq0$ paralelas para processar as sequências positiva e negativa de forma independente.

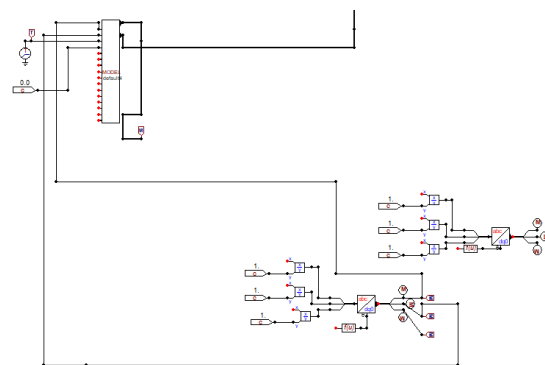


Figura 4: Subcircuito 4 do sistema para a simulação do controle síncrono d-q.

Esse arranjo, aliado ao condicionamento de sinais por blocos de ganho e normalização, permite que o inversor identifique e compense o degrau desequilibrado, mantendo a estabilidade do controle através das referências geradas no bloco MODELS.

A simulação da resposta do inversor sob controle dq0 a um degrau desequilibrado produziu os resultados apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. A Figura 5 ilustra o comportamento das correntes injetadas na rede, estabelecendo a relação da amplitude da corrente (em Amperes) em função do tempo (em segundos).

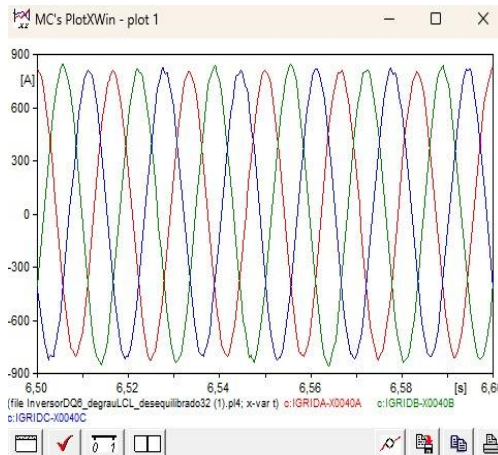


Figura 5: Gráfico das correntes injetadas na rede elétrica.

A Figura 6 apresenta o comportamento dos erros nos eixos d e q das correntes de sequência negativa após a filtragem pelo filtro rejeita-faixa (*Notch Filter*), ilustrando a variação da amplitude em função do tempo.

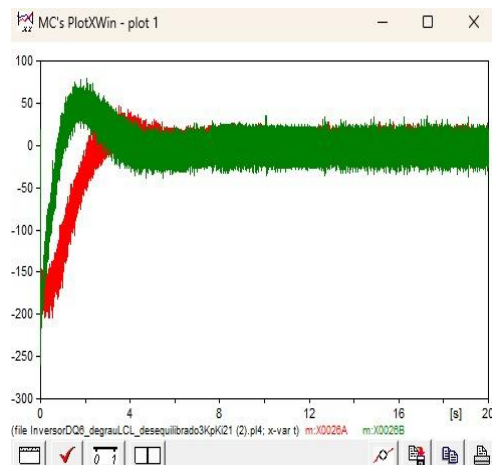


Figura 6: Gráfico dos erros nos eixos d e q das correntes de sequência negativa após serem filtradas pelo filtro.

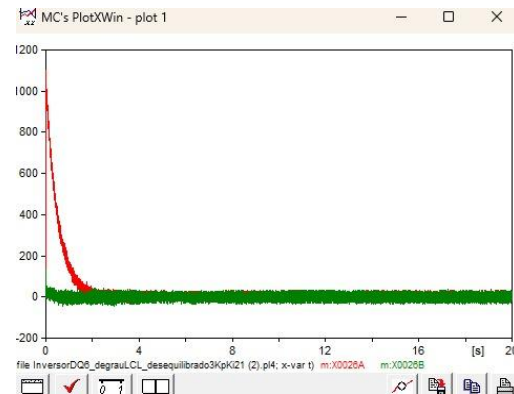


Figura 7: Gráfico dos erros nos eixos d e q das correntes de sequência positiva após serem filtradas pelo filtro.

A Figura 7, supracitada, apresenta o comportamento dos erros nos eixos d e q das correntes de sequência positiva após a filtragem pelo filtro rejeita-faixa (*Notch Filter*), ilustrando a variação da amplitude em função do tempo.

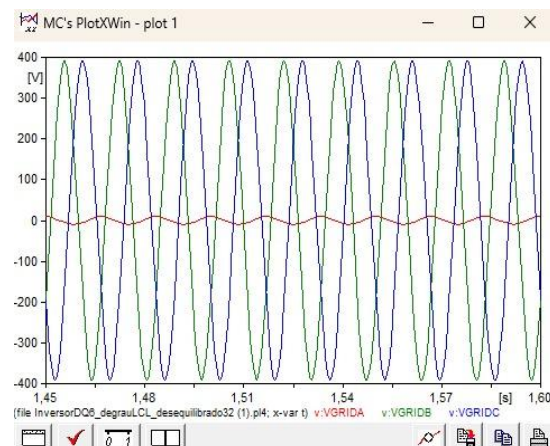


Figura 8: Gráfico das tensões da rede elétrica

A Figura 8 ilustra o gráfico das tensões da rede elétrica com uma senóide de amplitude de 10 V em função do tempo.

Os parâmetros de simulação foram consolidados em uma lista de variáveis globais, facilitando o ajuste de componentes críticos como os circuitos *snubbers*, considerando os parâmetros $R = 100 \Omega$ e $C = 1 \mu F$ e as constantes de ganho do controle dinâmico.

Essa padronização permite realizar múltiplas simulações alterando apenas os valores de referência para testar a robustez do sistema sob diferentes níveis de desequilíbrio.

Determinando com quais valores de K_p e K_i o sistema é estável:



$$D(s) = (s^2 + \omega_n s + \omega_n^2) \cdot [Ls^2 + (R + K_p)s + K_i] \quad (18)$$

Como os parâmetros L e R são positivos, o primeiro quadrático $s^2 + as + \omega_n^2$ também tem coeficientes positivos ($a > 0, \omega_n > 0$), logo seus dois pólos têm parte real negativa o que torna estável.

Assim, a estabilidade do sistema fica determinada apenas pelo segundo quadrático:

$$Ls^2 + (R + K_p)s + K_i \quad (23)$$

Adicionando mais algumas informações sobre as fronteiras de estabilidade, temos que se $K_i = 0$, aparece um pólo em $s=0$, marginalmente estável, não é assintoticamente estável. Se $K_p = -R$, então o termo em s some e o polinômio reduz-se a:

$$Ls^2 + K_i \quad (24)$$

com polos puramente imaginários (marginalmente estável) quando $K_i > 0$.

como exemplos práticos de pólos estáveis, que compõem a região de estabilidade, temos:

$$K_p = 0, K_i = 1; K_p = 1, K_i = 0,01; \quad (25)$$

Aplicando o critério de Hurwitz (ou simplesmente exigindo coeficientes positivos para uma equação quadrática com $L>0$), temos as condições necessárias e suficientes para ambos os polos desse quadrático ficarem no semiplano esquerdo:

$$R + K_p > 0 \quad (26)$$

$$K_i > 0 \quad (27)$$

Substituindo $R=0,00075$, obtemos a região explícita, temos: $K_i > 0$ e $K_p = -0,00075$.

Verificando o critério de Routh analisando o denominador da função de transferência com os valores de $L=1,73 \times 10^{-3}$ e $R=7,3 \times 10^{-4}$, e criou a tabela de Routh que usa o polinômio do denominador da função de transferência, para $K_p=0$ e $K_i=1$.

Tabela 2. Tabela de Routh para valores de $K_p=0$ e $K_i=1$.

Potência	Coluna 1 (pivôs)	Coluna 2	Coluna 3
S^2	0,00173	a_2	3
S^1	4,343	a_1	ω_n
S^0	$b_1 = \frac{(4,343 \cdot a_2 - 0,00173 \cdot a_1)}{4,343}$	ω_n	0
S^1	$c_1 = \frac{(b_1 \cdot a_1 - 4,343 \cdot \omega_n)}{4,343}$	0	0
S^0	ω_n	0	0

S^2	0,00173	a_2	3
S^1	4,343	a_1	ω_n
S^0	$b_1 = \frac{(4,343 \cdot a_2 - 0,00173 \cdot a_1)}{4,343}$	ω_n	0
S^1	$c_1 = \frac{(b_1 \cdot a_1 - 4,343 \cdot \omega_n)}{4,343}$	0	0
S^0	ω_n	0	0

Com a Tabela 2, confirma que o sistema de controle, para $K_p=0$ e $K_i=1$, é realmente estável, visto que todos os elementos da primeira coluna tem o mesmo sinal. Criando a Tabela 3 com base na estrutura da Tabela 1 e utilizando os valores de $K_p=1$ e $K_i=0,01$ para a equação característica $Ls^2 + (R + K_p)s + K_i = 0$, temos:

Tabela 3. Tabela de Routh para valores de $K_p=1$ e $K_i=0,01$.

Potência	Coluna 1 (pivôs)	Coluna 2	Coluna 3
S^2	0,00173	0,01	0
S^1	1,00073	0	0
S^0	$b_1 = \frac{(1,00073 \cdot 0,01 - 0,00173 \cdot 0)}{1,00073}$	0	0

Com a Tabela 3, confirma que o sistema de controle, para $K_p=1$ e $K_i=0,01$, é realmente estável, visto que assim como na todos os elementos da primeira coluna tem o mesmo sinal.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a análise de estabilidade e o projeto de um controlador PI para garantir estabilidade ao filtro do tipo *Notch* para a diminuição de ruídos de 60 Hz.

Utilizando o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz, validou-se matematicamente a estabilidade do sistema (NISE, 2017). A análise da tabela de Routh demonstrou que não há mudanças de sinal na primeira coluna, o que assegura que todas as raízes da equação característica possuem parte real negativa.



A análise demonstrou que a escolha dos parâmetros do controlador PI e de ganho influencia diretamente a margem de segurança do sistema.

Em conformidade com os resultados obtidos, conclui-se que uma modelagem matemática robusta, aliada à verificação de critérios de estabilidade, é indispensável. Como destacado por Silva (2018), essa abordagem garante o funcionamento do controlador e a filtragem de frequências de forma a não comprometer a dinâmica do sistema em malha fechada, especialmente sob condições de distúrbios na rede.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela concessão de força, sabedoria e resiliência ao longo desta jornada, iluminando os caminhos que tornaram possível a realização deste trabalho.

Expresso minha gratidão à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Norte (FAPERN), pela concessão da bolsa de iniciação científica e pelo fomento à pesquisa acadêmica.

Agradeço, ainda, ao orientador Adriano Aron Freitas de Moura, pelo apoio fundamental e pelas valiosas contribuições no desenvolvimento deste artigo.

REFERÊNCIAS

ALVES, Guilherme de Oliveira. Inclusão do Modelo do Regulador de Velocidade nos Problemas de Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo com Abordagem Trifásica. 2021. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021.

BOSE, Bimal K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. Sistemas de Controle Moderno. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018

LISERRE, M.; BLAABJERG F.; TEODORESCU, R.; Grid-connected converters: an overview of control strategies, IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 8-21, Spring 2007.

NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

PREECE, R.; TERZIDIS, K.; PANTELI, M. Electromagnetic Transient Simulation of Power Systems. IEEE, 2016.

RODRIGUEZ, P. et al., Multi-resonant synchronous reference frame controller for grid-connected converters under unbalanced voltage conditions, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, Oct. 2007.

SILVA, Paulo Ricardo da. Análise de três técnicas de controle para emprego de um conversor boost trifásico em uma estrutura retificadora híbrida com suportabilidade a afundamentos de tensão. 2018. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SOUZA, Bruno Cortes de. Métodos de Redução de Sistemas de Distribuição e Contribuições aos Estudos do Limite de Estabilidade de Tensão e das Múltiplas Soluções do Fluxo de Potência. 2021. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M RODRIGUEZ, P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

Yazdani, A.; IRAVANI, R. Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications. Hoboken, NJ, USA: IEEE Press/Wiley, 2010.

FREIJEDO, D. et al., A Comparison of Methods for dq Current Control of Grid-Connected PV Inverters, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 7, pp. 2825-2836, July 2011.