



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Desenvolvimento de um Controlador para um conjunto Motor Brushless DC + Bomba alimentado por um Painel Fotovoltaico

Guilherme Coelho - up202006885

Lucas Freitas - up202006938

David Barbosa - up202008529

Relatório do Trabalho Prático realizado no âmbito da Unidade Curricular Sistemas e Controlo de Potência, do primeiro ano de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores

24-12-2023

Declaramos que o presente trabalho/relatório é da nossa autoria e não foi utilizado previamente nou-
tro curso ou unidade curricular, desta ou de outra instituição. As referências a outros autores (afirmações,
ideias, pensamentos) respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, e encontram-se devidamente
indicadas no texto e nas referências bibliográficas, de acordo com as normas de referenciação. Temos
consciência de que a prática de plágio e auto plágio constitui um ilícito académico.

No "Código Ético de Conduta Académica", art.14, Universidade do Porto.

1 Resumo

O propósito deste trabalho foi estudar o funcionamento e controlo de um motor DC sem escovas (*BrushlessDCMotor*) com o programa PSIM e as suas simulações. O motor é alimentado por painéis fotovoltaicos e, com uma bomba, o sistema é capaz de bombear água numa altura desde 10 até 20 metros de altura. Durante o estudo verificamos o funcionamento dos conversores de tensão dc-dc, painéis fotovoltaicos e feedback de velocidade com as figuras geradas pelo simulador e, com a devido estudo, validamos ou não o desempenho das máquinas. No fim, o sistema cumpriu o seu objetivo de fornecer 30 m³ de água diariamente, sendo uma experiência importante para perceber a importância dos motores BLDC e os métodos de controlo associados aos mesmos.

Palavras-Chave: motor, BLDC, Boost, Painei Fotovoltaico.

Índice

1	Resumo	1
2	Introdução	1
3	Motor BLDC	2
4	Alimentação do Sistema	3
4.1	Painel fotovoltaico	3
4.1.1	Estudo do local de instalação	3
4.1.2	Área necessária de Painei	3
4.2	Conversor DC-DC	4
5	Controlo do motor	6
5.1	Tipos de controladores	6
5.2	Controlador de velocidade com sensores de posição	7
5.2.1	Feedback de Velocidade	8
6	Carga Aplicada ao motor	9
7	Análise de resultados	11
8	Conclusão	13

2 Introdução

Este trabalho consiste no estudo e implementação de um conjunto motor-bomba capaz de bombear água numa altura desde 10 até 20 metros de altura da fonte. Foi-nos sugerido utilizar um motor DC sem escovas (*BrushlessDCMotor*) alimentado por painéis fotovoltaicos para fornecer 30 m³ de água diariamente.

Os testes e validações dos resultados foram feitos com a ferramenta PSIM. O Software permite a criação de simulações para observar o comportamento do motor e dos seus sistemas ao longo do tempo definido pelo utilizador. Com o decorrer deste trabalho, utilizamos algumas das figuras geradas simulação para demonstrar o funcionamento e o desempenho dos sistemas desenvolvidos.

O controlo do motor foi feito por um sistema de feedback da velocidade. Decidimos optar por um sistema deste tipo uma vez que o motor utilizado na experiência possui sensores de posição do rotor. Com o devido controlador, é possível através da variação da posição do motor ao longo do tempo determinar a velocidade de rotação do motor, sem a necessidade de um dispositivo externo. No fim, tivemos um

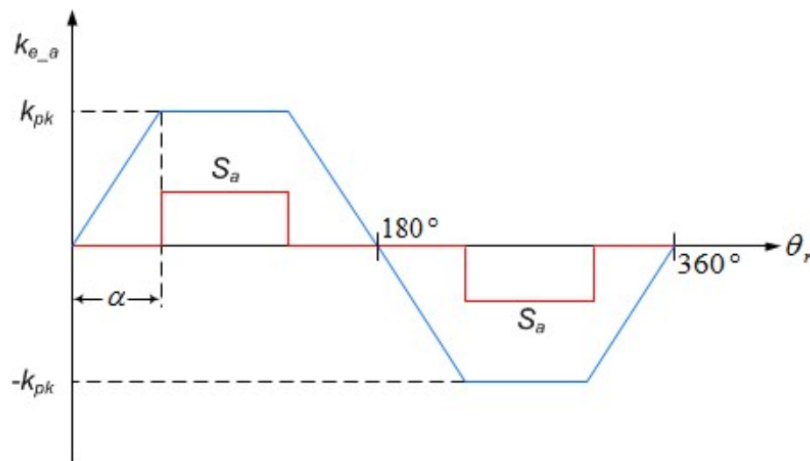


Figura 1: Exemplo de uma onda trapezoidal na fase A. k_{e_a} é um coeficiente que depende do ângulo do rotor.

sistema com realimentação capaz de garantir que o número de revoluções por minuto possua tendência para a velocidade nominal ao longo do tempo.

A alimentação do motor é feita por um conjunto de painéis fotovoltaicos que convertem a energia térmica do sol em energia elétrica. Como a queda de tensão no final do conjunto dos painéis é aproximadamente 300V, é necessário utilizar um conversor DC-DC (Boost) para transformar a energia obtida nos 500V precisos para a tensão de barramento.

Por fim, fomos capazes de atingir o objetivo proposto ao perceber os métodos de controle de cada sistema. Obtivemos resultados ótimos graças à experiência do trabalho anterior que possui algumas similaridades, e também graças à ajuda do professor, que esteve disponível durante todo o tempo do trabalho e levantou críticas construtivas durante a apresentação.

3 Motor BLDC

Como o nome sugere, motores BLDC (Brushless DC) são motores que não utilizam escovas. A rotação do rotor é provocada pela troca controlada da direção dos campos magnéticos feitos pelas bobinas fixas ao estator. As bobinas, por sua vez, permitem controlar a posição do rotor com elevada precisão juntamente com mecanismos de feedback. Outra grande vantagem de não ter escovas é o baixo desgaste e o consequente baixo ruído eletrônico.

O motor em estudo é comutado eletronicamente. Ou seja, as bobinas do estator devem ser excitadas de uma forma e sequência determinada dependendo da posição do rotor. Para conhecer a posição do rotor são utilizados 3 sensores de efeito Hall. Cada sensor está incorporado no estator e são capazes de gerar um sinal sempre que polos magnéticos se aproximam do sensor. No fim, depois de combinar os 3 sinais, torna-se possível adquirir a posição do rotor.

A comutação do motor BLDC pode ser feita com uma onda trapezoidal ou com uma onda sinusoidal. Além da produção de corrente trapezoidal é mais simples do que corrente sinusoidal, a comutação trapezoidal envolve o acionamento de duas fases de cada vez, enquanto que a comutação sinusoidal são acionadas 3 fases. Apesar de nos dois métodos acionarem diferentes fases, continuam a existir seis estados de condução, ou seja, um para cada 60° elétricos.

4 Alimentação do Sistema

4.1 Painel fotovoltaico

A alimentação do nosso sistema é feita com painéis fotovoltaicos. Estes painéis transformam a energia térmica solar para energia elétrica. Uma vez que a irradiância no local do sistema é de aproximadamente $4kWh/m^2/dia$ (valor muito acima da média), torna a utilização da radiação solar para eletricidade inevitável.

4.1.1 Estudo do local de instalação

Um dos fatores importantes para calcular a área necessária de painel fotovoltaico foi determinar o de tempo de atividade dos painéis durante um dia. Para isto, fizemos uma aproximação genérica da irradiância diária de Portugal em relação do tempo e, com a função `trapz()` do Matlab, obtivemos o valor aproximado da integral da curva feita ou irradiância do local por dia, obtendo assim a energia em Joules. No fim, ajustamos a curva até obter a irradiância do local do sistema, demonstrado na figura X:

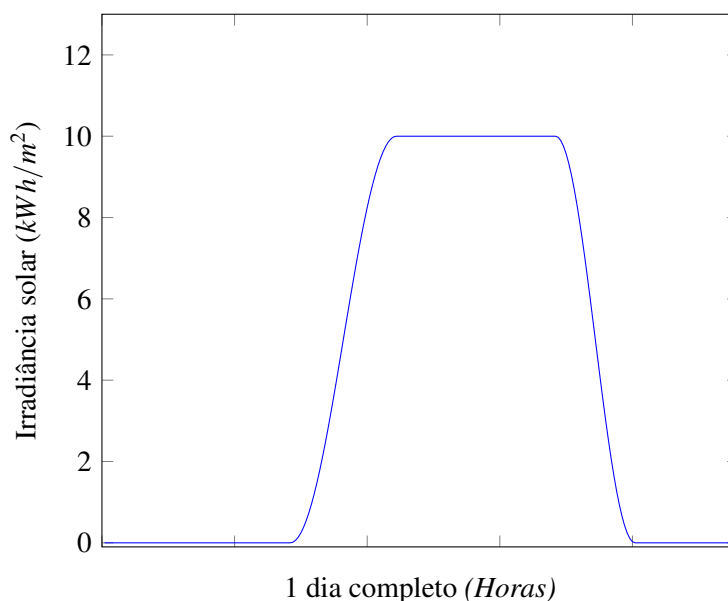


Figura 2: Curva da Irradiância solar ao longo de um dia.

Com a curva anterior, podemos concluir que os painéis fotovoltaicos vão estar ativos durante aproximadamente 10 horas por dia.

4.1.2 Área necessária de Painel

Para determinar a área necessária de painéis solares, obtivemos o valor da energia potencial da água E_p e a energia máxima recolhida durante o período ativo por metro quadrado. O cálculo da energia potencial foi feita da seguinte maneira:

- Água total movida: $TotalWater = 30 \cdot 10^3 Kg$.
- Gravidade: $g = 9.81m/s^2$.
- Altura da água no pior caso: $Height = 20m$.
- Performance da bomba: $bombPerformance = 80\%$.

$$E\rho = \frac{TotalWater \cdot g \cdot Height}{bombPerformance} \quad (1)$$

$$E\rho = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 20}{0.8} \quad (2)$$

$$E\rho = 5.886 \cdot 10^6 J \quad (3)$$

Já para a energia convertida pelos painéis, o Matlab foi usado novamente. Através da curva gerada no capítulo anterior, alteramos o valor de pico da curva em relação ao limite máximo da conversão de energia do painel, obtendo a seguinte figura:

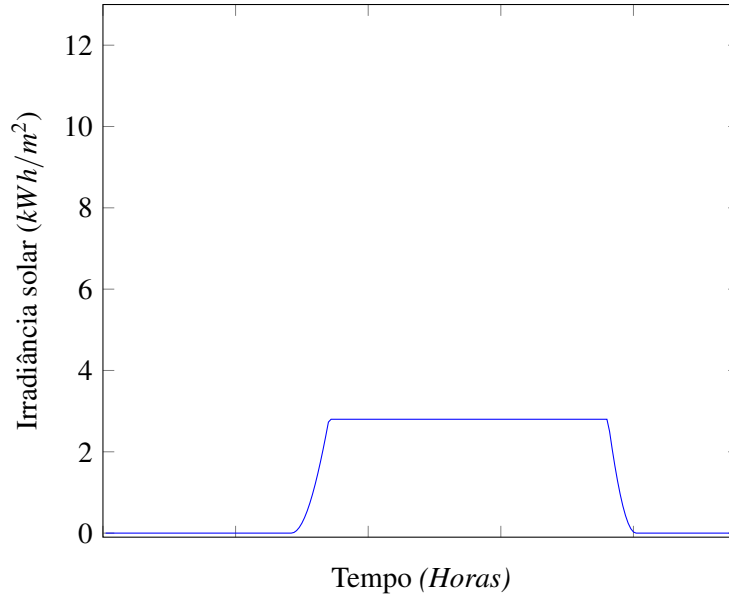


Figura 3: Curva de Irradiância solar ao longo de um dia

Com esta figura podemos concluir que com o aumento da irradiância o painel fica limitado a uma taxa de conversão. Além disso, serve também para determinar a energia convertida por um metro quadrado de painel fotovoltaico quando a eficiência é 100%. Recorrendo novamente às ferramentas do Matlab e, assumindo um rendimento de 15% na conversão, obtivemos o valor de $4.1 \cdot 10^5 J$ de energia por metro quadrado de painel ao longo de um dia.

No fim, para determinar a quantidade necessária de painel fotovoltaico fizemos a divisão entre a energia potencial da água e a energia por metro quadrado de painel.

$$Area = \frac{E\rho}{E_{pv}/m} \quad (4)$$

$$Area = \frac{5.886 \cdot 10^6}{4.1 \cdot 10^5} \quad (5)$$

$$Area = 14.25 \approx 15 m^2 \quad (6)$$

Assim, determinamos que $15 m^2$ serão suficientes para cumprir o objetivo do sistema.

4.2 Conversor DC-DC

Como mencionado anteriormente, o Painel Solar é capaz de gerar uma tensão de 300VDC, o que não é suficiente para alimentar o motor que requer uma tensão de 500VDC para operar. Para solucionar esse problema, optamos por utilizar um conversor DC-DC Boost, que habilita a transição da tensão de 300VDC para 500VDC.

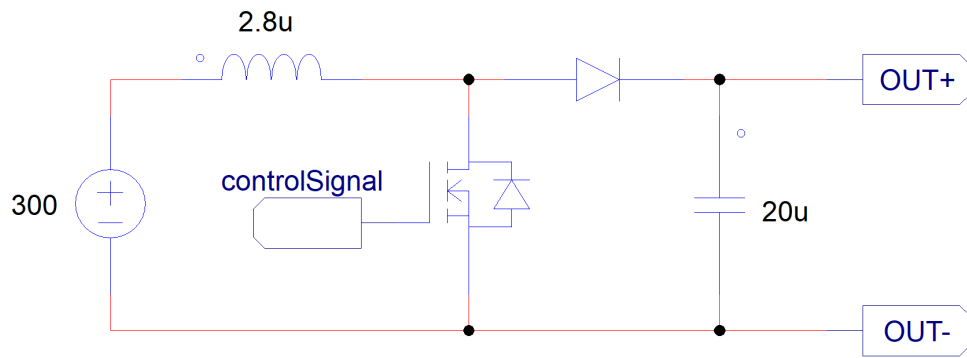


Figura 4: Conversor DC-DC utilizado.

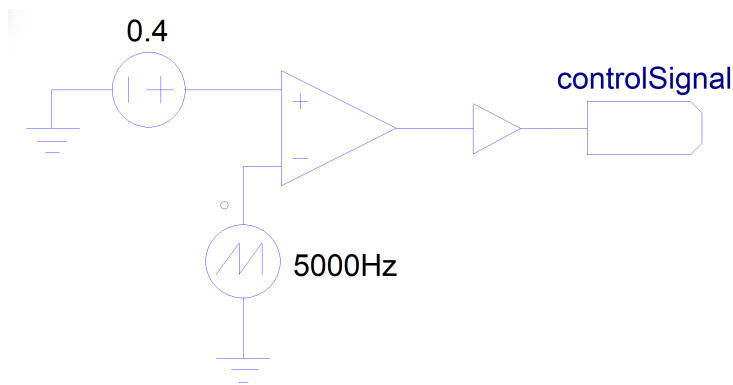


Figura 5: Controlador do conversor.

Ao analisarmos a figura 4, denota-se a importância de dimensionar a bobina (L) e do condensador (C) para alcançar o comportamento desejado do motor. Seleccionamos um valor adequado para o condensador, um valor bastante grande, assegurando o acoplamento eficiente com a ponte inversora. Para isso, adotamos os seguintes parâmetros:

- V_{in} : 300 V .
- V_{out} : 500 V .
- I_{out} : 3A .
- F_s : 5000Hz .
- C : 20 μ F .

Com estes dados em mente aplicamos as seguintes fórmulas:

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (7)$$

$$D = 0.4 \quad (8)$$

$$L = \frac{1}{2 \cdot I_{out}} \cdot T_s \cdot V_o \cdot D(1 - D)^2 \quad (9)$$

$$L = 2.8\mu H \quad (10)$$

Com os valores obtidos, alcançamos uma tensão média de saída de aproximadamente 500 VDC, conforme demonstra a figura 6:

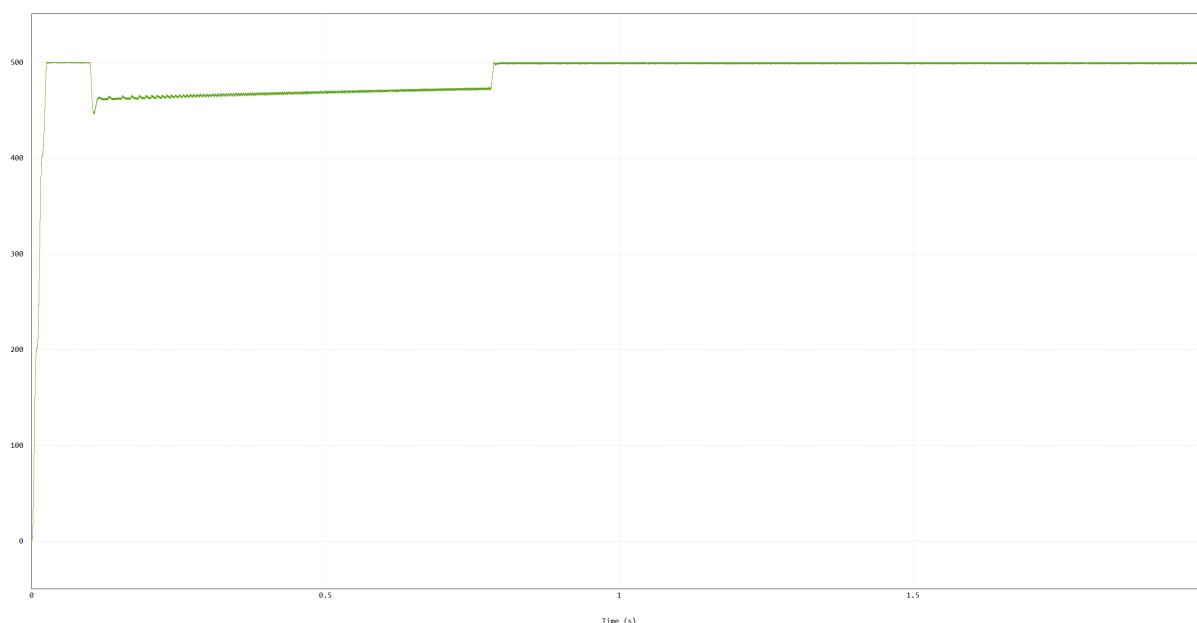


Figura 6: Tensão de Boost. Vale notar que existem algumas quedas devido ao arranque do motor no início da simulação.

Por último, substituímos a fonte de tensão constante pelo sistema de alimentação dimensionado nesta secção, conseguindo assim uma alimentação mais próxima do modelo real.

5 Controlo do motor

5.1 Tipos de controladores

No que diz respeito ao controlador do motor, podemos destacar a existência de pelo menos três controladores relevantes para a execução deste trabalho.

Um deles é o controlador de tensão, que funciona com base numa velocidade de referência e no feedback da posição do motor, obtido através dos sensores de Hall já incorporados no motor. Utilizando essas informações, o controlador ajusta a tensão fornecida ao motor para alcançar a velocidade desejada. No entanto, esse tipo de controlador não se adequa ao nosso trabalho, uma vez que o nosso objetivo é manter uma tensão de barramento constante, dado que a nossa fonte de alimentação é proveniente do conversor DC-DC (boost).

Outro controlador é o de velocidade, já abordado em trabalhos anteriores, que requer uma velocidade de referência e um feedback de velocidade do motor. Diferentemente do controlador mencionado anteriormente, este controlador, com base nessas informações, regula a ponte inversora usando (PWM) para atingir a velocidade de referência desejada. Entretanto, esse tipo de controlador não é aplicável ao nosso trabalho, uma vez que, apesar de manter uma tensão constante (resolvendo o problema do controlador mencionado anteriormente), não aproveita a vantagem intrínseca do motor em questão, sendo a presença dos sensores de Hall.

Por fim existe um controlador de velocidade com referência de posição. Como o próprio nome sugere, ele utiliza uma referência de velocidade, o feedback de velocidade do motor e os dados provenientes dos sensores de Hall para regular a ponte inversora. Este tipo de controlador é o preferencial, pois otimiza o aproveitamento das vantagens inerentes ao motor e consegue atender ao objetivo de atingir a velocidade desejada num tempo considerável. Ao contrário dos outros controladores, este é vantajoso, sendo a nossa escolha para dar continuidade ao trabalho.

5.2 Controlador de velocidade com sensores de posição

Para controlar a velocidade do motor utilizamos os sensores de posição. Como referido na secção motores BLDC, existem seis estados da condução do motor(um para cada 60°). Cada estado pode ser obtido com a combinação dos 3 sensores Hall.

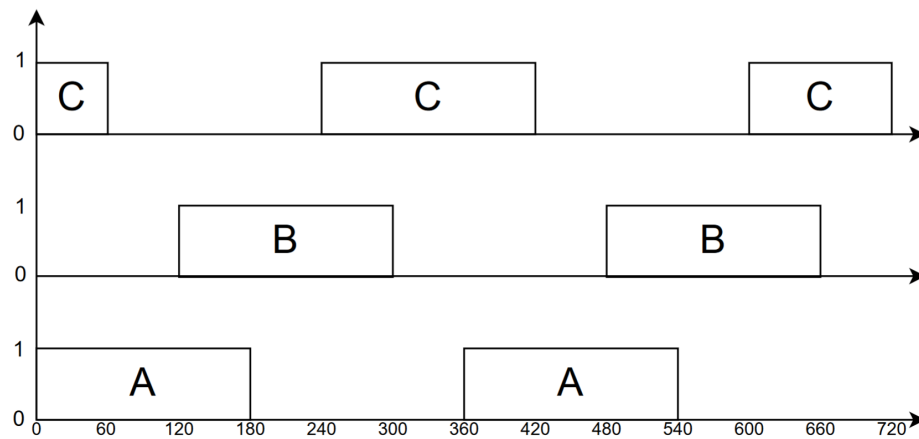


Figura 7: Estado dos sensores ao longo de 2 rotações.

Estado	Combinação dos sensores Hall
1	101
2	100
3	110
4	010
5	011
6	001

Tabela 1: Estados e respectivas combinações dos sinais Hall.

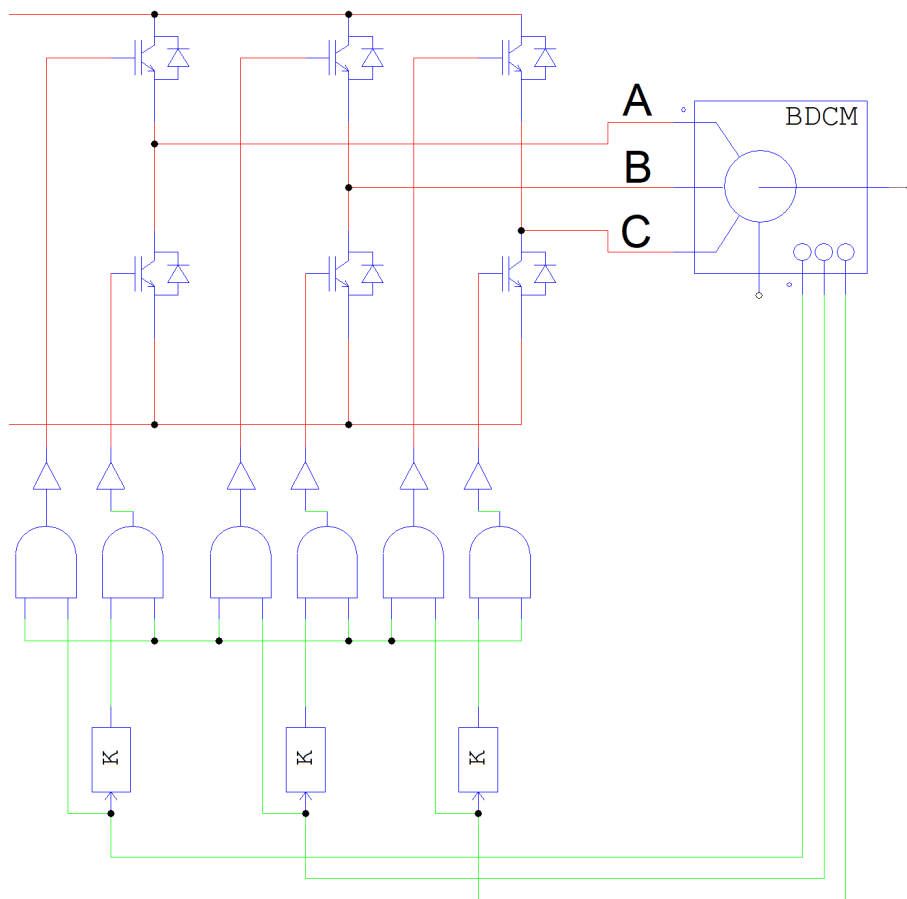


Figura 8: Implementação no PSIM. Nota: $k = -1$.

Com base na figura 8, temos a ligação dos sensores aos transístores da ponte inversora. Os transístores têm o papel de alterar a corrente em cada fase, removendo-a completamente ou então alterando o sentido da mesma, em função dos sinais recebidos dos sensores Hall. O operador lógico utilizado na figura acima é explicado no próximo subcapítulo.

5.2.1 Feedback de Velocidade

Assim que o motor estava funcional com os sensores de posição do rotor, fizemos um sistema para controlar a velocidade do motor como mostra a Figura 9.

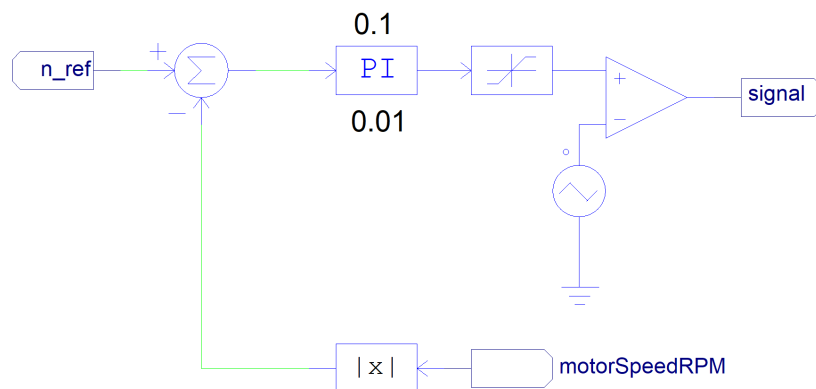


Figura 9: Controlador da velocidade do motor.

O controlador da figura 9 funciona da seguinte maneira: Primeiro é feita a subtração do sinal da

velocidade de referência ou desejada com a velocidade atual do motor (*motorSpeedRPM*). A seguir, o sinal obtido pela subtração é passado por um controlador Integrador que possui a seguinte função de transferência:

$$G(w) = k \cdot \frac{1 + sT}{sT} \quad (11)$$

Por fim, é feito a comparação do sinal obtido do bloco integrador com uma onda triangular com amplitude de 1V, frequência de 1kHz e *dutycycle* de 0,5.

Para implementar este sistema de controlo de velocidade utilizamos a porta lógica "And". Este operador faz o "e"lógico entre o sinal negado do sensor Hall(o sinal é multiplicado por -1) e o sinal gerado pelo feedback de velocidade, resultando na seguinte implementação:

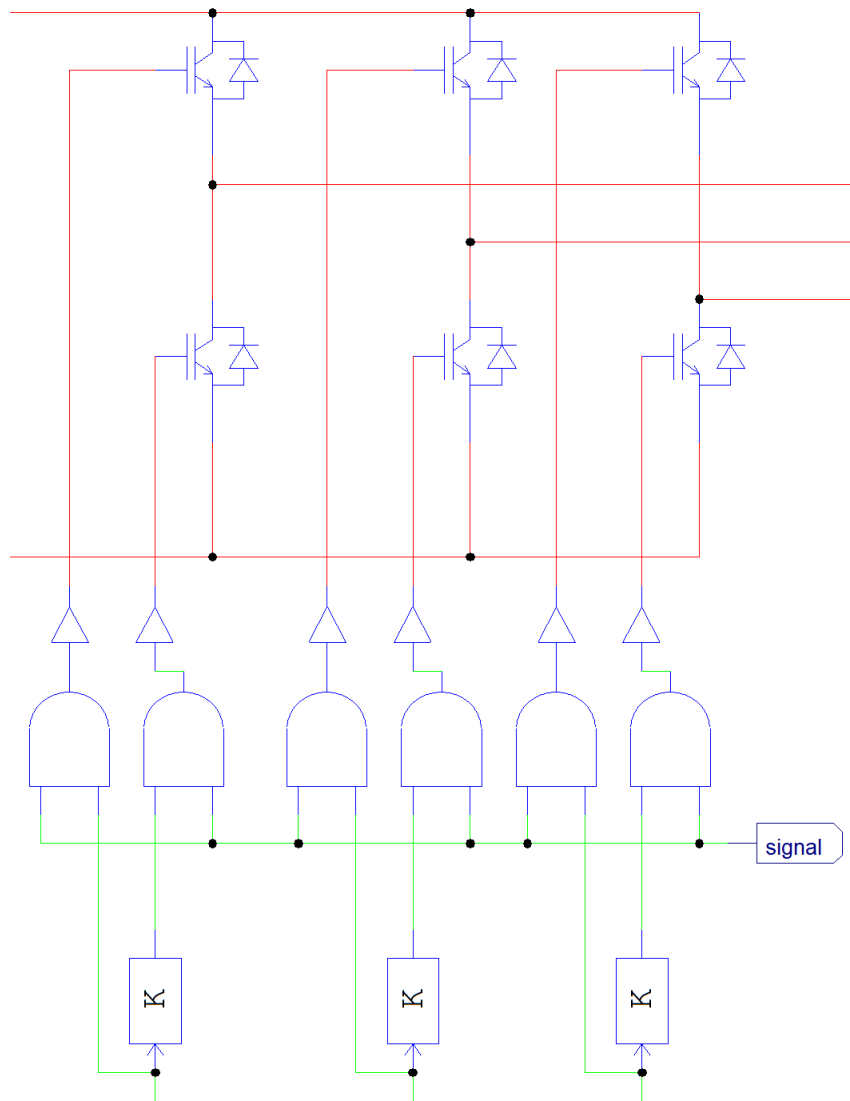


Figura 10: Utilização do sistema de feedback de velocidade para controlar o Inversor.

6 Carga Aplicada ao motor

Como é referido na introdução, o objetivo do nosso motor + bomba é bombear cerca de 30 m³ de água por dia. Para isso ser viável em termos de simulação, temos que calcular o torque correspondente e considerar um momento de inércia típico para Bombas hidráulicas (cerca de 0.01 kgm²). Recorrendo ao livro de Bombas e Instalações Hidráulicas, conseguimos apresentar a seguinte equação:

$$Torque = \frac{Waterflow \cdot WaterDensity \cdot Height \cdot g}{PumpPerformance \cdot MotorSpeed} \quad (12)$$

Onde:

- *Waterflow* , Fluxo de água (m^3/s).
- *WaterDensity* , Densidade da água (Kg/m^3).
- *Height* , Altura a que a está localizada (m).
- *g* Aceleração Gravítica (m/s^2).
- *PumpPerformance* , Eficiência da bomba (%).
- *MotorSpeed* , Velocidade do motor (rad/s).

Com a equação acima, destacam-se as variáveis que nos ajudaram a obter uma simulação mais abrangente: Velocidade do Motor (*MotorSpeed*), Altura (*Height*) e Fluxo de Água (*WaterFlow*). Inicialmente, considerou-se um fluxo de água constante, aproximadamente 3.47×10^{-4} , resultado obtido conforme a equação 14, e uma altura variável entre 10 e 20 metros. O desempenho da bomba é um valor também constante, aproximadamente 80%, um valor típico para bombas de água acopladas a motores. A Velocidade do Motor é uma variável dependente do motor, sendo inserida na equação com base na velocidade instantânea do motor.

$$WaterFlow = \frac{WaterVolume}{3600 \times 24} \quad (13)$$

$$WaterFlow = \frac{30}{3600 \times 24} \quad (14)$$

Com a informação que temos acima calculamos o torque mínimo e máximo para a altura variável e velocidade expectável de 3000 RPM:

Para 20 m:

$$Torque = \frac{3.47 \times 10^{-4} \times 997 \times 20 \times 9.81}{0.8 \times 314.16} \quad (15)$$

$$Torque = 0.270Nm \quad (16)$$

Para 10 m:

$$Torque = \frac{3.47 \times 10^{-4} \times 997 \times 10 \times 9.81}{0.8 \times 314.16} \quad (17)$$

$$Torque = 0.135Nm \quad (18)$$

Por fim convertemos estas equações matemáticas em parâmetros do PSIM chegando ao seguinte bloco de controlo da figura 11:

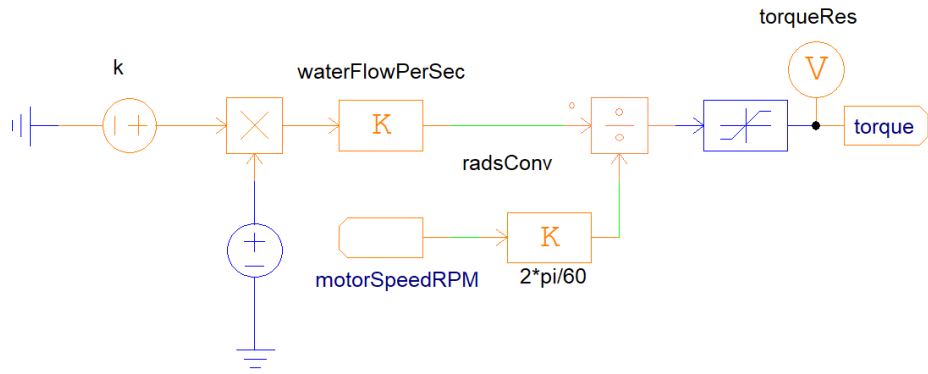


Figura 11: Sistema de cálculo do Torque.

7 Análise de resultados

Tendo agora uma noção mais aprofundada do controlo do motor prosseguimos à testagem com diferentes velocidades de referência e cargas diferentes.

Para os seguintes parâmetros obtivemos estes resultados:

- $V_{ref} = 3000$.
- $T_{load} = 0.270Nm$.

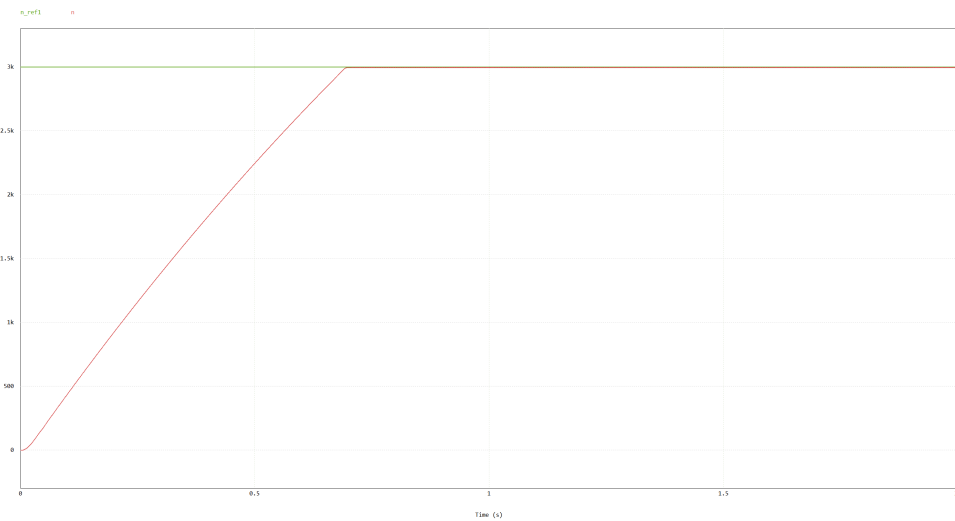


Figura 12: Simulação obtida com os valores anteriores. A verde está a velocidade de referência e a vermelho a velocidade de rotação do motor.

- $V_{ref} = 2600$.
- $T_{load} = 0.270Nm$.

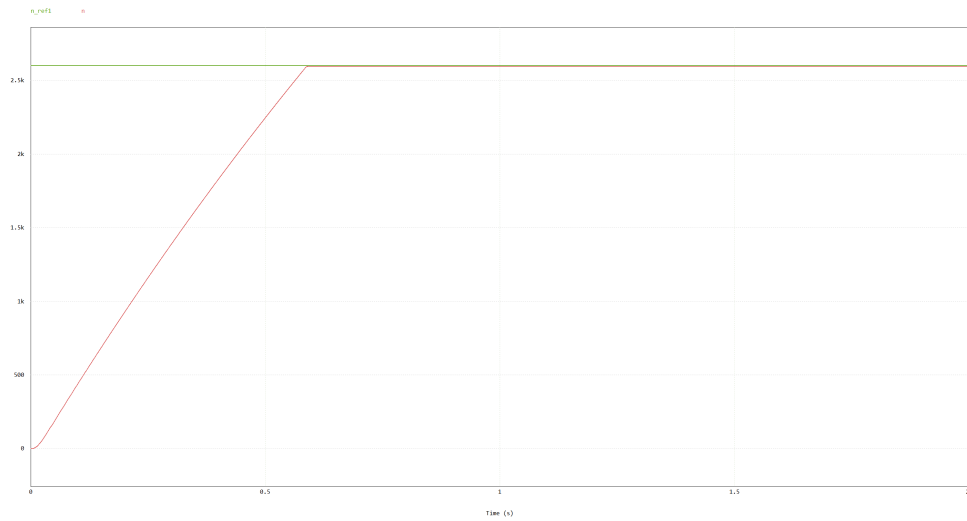


Figura 13: Simulação obtida com os valores anteriores.

- $V_{ref} = 2600 - 3000$.
- $T_{load} = 0.270Nm$.

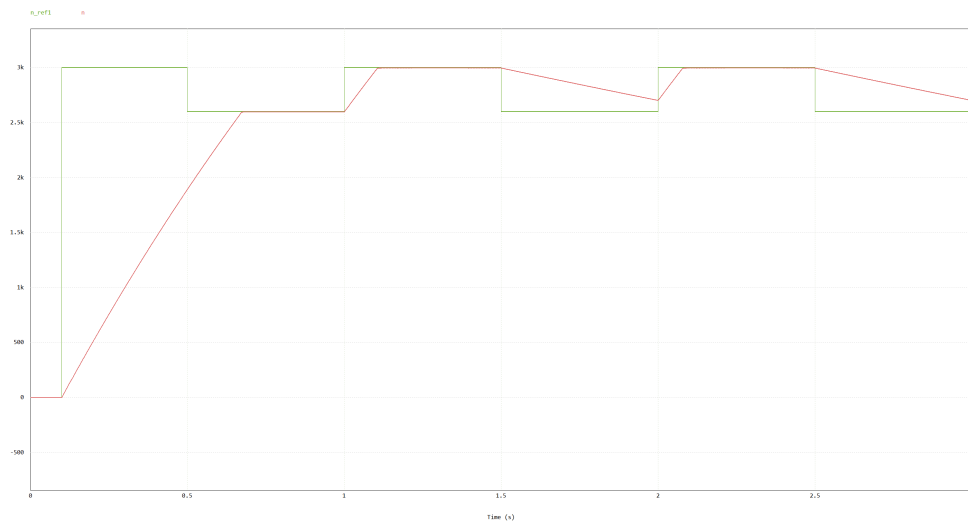


Figura 14: Simulação obtida ao variar a velocidade nominal entre 2600 e 3000. Vale notar que existe um período com velocidade nominal a 0 devido à preparação do conversor DC-DC.

- $V_{ref} = 2600 - 3000$.
- $T_{load} = 0.135Nm$.

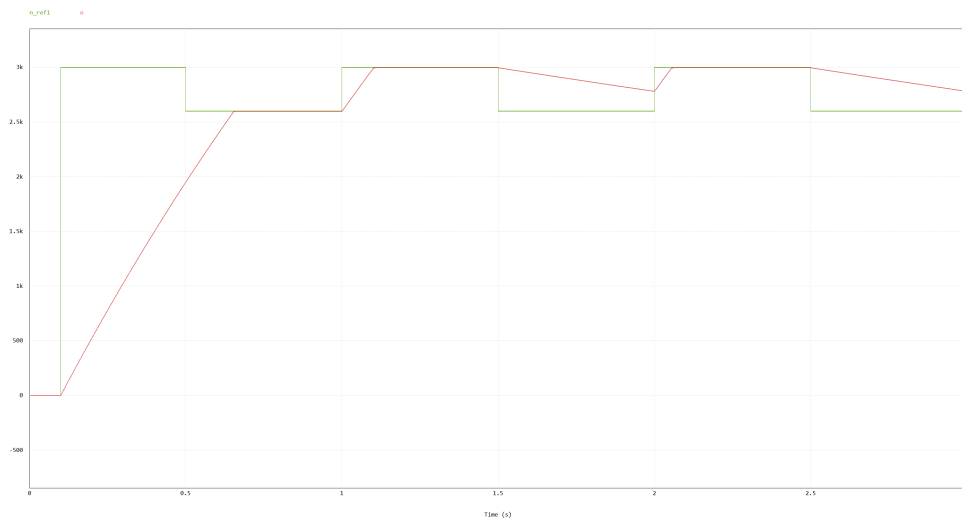


Figura 15: Simulação obtida também a variar a velocidade nominal. A curva obtida é bastante similar à obtida anteriormente com a principal diferença sendo o menor decaimento de velocidade entre os períodos que a velocidade de rotação é menor do que a velocidade de referência.

Ao examinar os dois primeiros gráficos, é evidente uma variação no tempo que o motor leva para responder à referência, mantendo a velocidade constante (140 milissegundos). Esta variação decorre da facilidade em atingir uma velocidade menor, resultando num tempo mais curto para que o motor alcance a velocidade desejada.

Nas últimas duas imagens, destaca-se uma discrepância na evolução da velocidade do motor, especialmente durante a desaceleração, em função de diferentes cargas. Esse fenómeno é atribuído à presença de uma carga mais elevada, simplificando o processo de desaceleração do motor. Nas mesmas imagens, é possível notar que o valor do binário permanece dentro dos limites esperados, sendo seu valor máximo calculado previamente na secção de Dimensionamento da carga.

8 Conclusão

Ao longo deste trabalho, foi possível aplicar os conhecimentos obtidos durante as aulas e também aprender mais na configuração e controlo de um motor BLDC. As simulações revelaram-se muito importantes para testar diferentes cenários de alimentação (rede e painéis fotovoltaicos), diferentes cargas e diferentes formas de controlo do motor.

Dito isto, aprendemos que recorrer às simulações é um método muito relevante para testar circuitos e motores numa primeira instância, sendo assim uma ferramenta importante para analisar as capacidades do sistema em geral e compreendê-lo. Deixamos aqui o nosso agradecimento ao Professor Rui Araújo pela ajuda e acompanhamento que tornou esta atividade possível.

Referências

- [1] B. M. Wilamowski, J. D. Irwin (Ed.s). *Power Electronics and Motor Drives*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, 2011.
- [2] Renesas Electronics Corporation, What are Brushless DC Motors, *What are Brushless DC Motors*, <https://www.renesas.com/us/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview>, 2023.