1. **Configuração básica de um conversor Buck-Boost**

O conversor DC-DC Buck-Boost, conforme a Figura X, é um tipo de conversor de potência que pode produzir uma tensão de saída maior ou menor que a tensão de entrada.

Figura X: Esquemático do Conversor Buck-Boost

A diagram of a circuit

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: SLVA535B

Ele é composto pelos seguintes componentes principais:

* **SW 1, SW 2, SW 3, SW 4:** quatro comutadores, geralmente implementadas com MOSFETs. O chaveamento controlado dessas chaves determina o aumento ou redução da tensão.
* **L:** indutor responsável por armazenar a energia e realizar sua transferência a partir do funcionamento dos comutadores.
* **CIN:** capacitor de entrada para filtrar oscilações e fornecer uma tensão mais estável para o conversor.
* **COUT:** capacitor de saída para suavizar oscilações e fornecer uma tensão de saída mais estável para a carga.

**2. Princípio de Operação**

Ciclo de Trabalho é a fração de tempo em que um sinal ou uma chave está ligado dentro de um período fixo.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

Ciclo de Trabalho Complementar é a fração de tempo em que o mesmo sinal está desligado dentro do mesmo período fixo.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

A Figura X descreve graficamente esse conceito e será útil futuramente, pois o ciclo de trabalho e seu complementar será necessário durante a aplicação do conversor.

Figura X: Ciclo de Trabalho Complementar

A screenshot of a diagram

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Mathematica)

**2.1 Buck Síncrono**

A Figura X demonstra esse modo de funcionamento. O comutador Q3 é totalmente ligado e o comutador Q4 é totalmente desligado. Q1 e Q2 são controlados por D e 1 - D, respectivamente, e o sistema se torna um conversor Buck sincronizado.

Figura X: Buck Síncrono

A diagram of a circuit

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: PMP21529

O ciclo de trabalho do modo Buck é calculado conforme a equação a seguir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

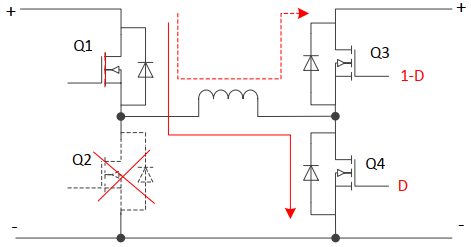
Onde:

Como nesse modo deseja-se reduzir a tensão de entrada, é necessário que esta seja maior que a tensão de saída (). Apenas duas chaves são comutadas, e não é possível operar com , pois nessas condições e o comutador Q1 fica ligado junto ao comutador Q3, causando um curto no sistema.

**2.2 Boost Síncrono**

A Figura X demonstra esse modo de funcionamento. O comutador Q1 é totalmente ligado e o comutador Q2 é totalmente desligado. Q3 e Q4 são controlados por 1 - D e D, respectivamente, e o sistema se torna um conversor Boost sincronizado.

Figura X: Bost Síncrono

****

Fonte: PMP21529

O ciclo de trabalho do modo Boost é calculado conforme a equação a seguir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

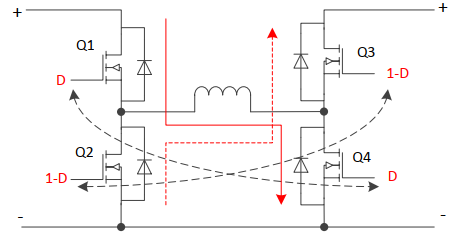
Onde:

Como nesse modo deseja-se aumentar a tensão de entrada, é necessário que esta seja menor que a tensão de saída (). Apenas duas chaves são comutadas, e não é possível operar com , pois nessas condições e o comutador Q1 fica ligado junto ao comutador Q3, causando um curto no sistema.

**2.3 Buck-Boost Síncrono**

A Figura X demonstra esse modo de funcionamento. O comutador Q1 e Q4 são controlados por D, enquanto Q2 e Q3 são controlados por 1 - D, e o sistema se torna um conversor Buck-Boost sincronizado.

Figura X: Buck-Bost Síncrono

****

Fonte: PMP21529

O ciclo de trabalho do modo Buck-Boost é calculado conforme a equação a seguir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

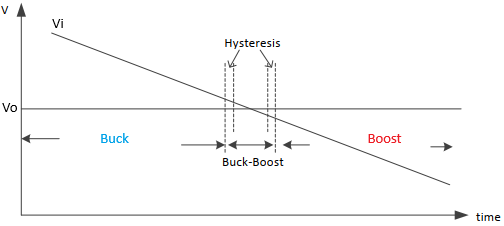
Onde:

Como nesse modo deseja-se reduzir ou aumentar a tensão de entrada, é possível utilizar durante a condição restrita dos modos anteriores, quando no modo Buck ou no modo Boost, pois na condição em que no modo Buck-Boost, . As quatros chaves são comutadas, reduzindo a eficiência em troca de operar nas condições restritas.

**3. Modo de Operação**

Os quatro interruptores alteram o modo de operação de acordo com a tensão de entrada e a tensão de saída, conforme mostrado na Figura X. Para evitar um salto entre as operações e evitar oscilações, uma histerese pode ser adicionada entre a transição dos modos.

Figura X: Modos de Operação com Base nas Tensões



Fonte: PMP21529

Durante a operação Buck, conforme a tensão de entrada diminui, o valor do ciclo de trabalho aproxima-se de 1, conforme a Equação X e o sistema realiza a troca de modo antes dessa ocorrência. O mesmo ocorre durante a operação Boost, conforme a tensão de entrada aumenta, o valor do ciclo de trabalho aproxima-se de 0, conforme a Equação X e o sistema troca de modo antes dessa ocorrência. Portanto, deve-se definir o limiar para a realização de trocas de modo, por exemplo, trocar de Buck para Buck-Boost quando .

**4. Implementação**

Os comutadores usados nessa aplicação serão MOSFETs. Um tempo de inatividade durante a comutação deve ser considerado para evitar correntes de disparo, evitando, por exemplo, que Q1 e Q2 estejam acionados ao mesmo tempo. Para acionamento dos comutadores, é necessário o uso de gate drives, pois as saídas dos circuitos de controle são de baixa potência, sendo incapazes de realizar o acionamento adequada dos comutaores.

Para o dimensionamento dos componentes em cada modo de operação, utiliza-se as equações a seguir.

**4.1 Buck**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

**4.2 Buck-Boost**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

**4.3 Boost**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

**5. Design**

Considerações iniciais:

A Tabela X a seguir resume o cálculo do ciclo de trabalho para cada modo de operação, para os cálculos das regiões de operação a seguir.

Tabela X: Resumo do Ciclo de Trabalho por Modo de Operação

|  |  |
| --- | --- |
| Modo de operação | Ciclo de trabalho |
| Buck |  |
| Buck-boost |  |
| Boost |  |

**5.1 Região Buck**

Utilizando a Equação X, calcula-se os valores mínimos e máximos da tensão de saída possíveis nessa região com base no ciclo de trabalho determinado.

Agora calcula-se uma relação entre entrada e saída que limitam essa região.

Assim, enquanto a relação estiver entre 1.25 e 5, o modo de operação será Buck.

Considera-se a região esquerda como Buck, central como Buck-Boost e direita como Boost para as definições seguintes.

Quando o limite esquerdo 1.25 é atingido, é possível calcular a tensão de saída mínima e máxima de transição com base na tensão de entrada mínima e máxima, determinando a fronteira da região Buck com a região central.

Obtém-se que a região Buck opera com tensões de entrada entre 18 e 30 V, e tensões de saída entre 6 e 24 V. A fronteira com a região central consiste em uma reta com tensões de saída entre 14.4 e 24 V.

**5.2 Região Boost**

Utilizando a Equação X, calcula-se os valores mínimos e máximos da tensão de saída possíveis nessa região com base no ciclo de trabalho determinado.

Agora calcula-se uma relação entre entrada e saída que limitam essa região.

Assim, enquanto a relação estiver entre 0.2 e 0.8, o modo de operação será Buck.

Quando o limite direito 0.8 é atingido, é possível calcular a tensão de saída mínima e máxima de transição com base na tensão de entrada mínima e máxima, determinando a fronteira da região Boost com a região central.

Obtém-se que a região Boost opera com tensões de entrada entre 18 e 30 V, e tensões de saída entre 22.5 e 150 V. A fronteira com a região central consiste em uma reta com tensões de saída entre 22.5 e 37.5 V.

**5.2 Região Buck-Boost**

A região central, é obtida automaticamente ao identificar-se as duas fronteiras. Portanto, obtém-se que a região Buck-Boost opera com tensões de entrada entre 18 e 30 V, e tensões de saída entre 14.4 e 37.5 V.

**5.3 Regiões de operação**

Novas considerações:

A Tabela X a seguir resume as novas informações obtidas para cada modo de operação.

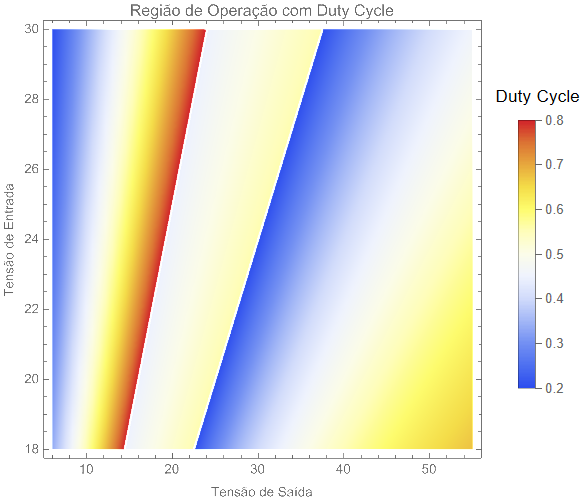
Tabela X: Resumo da Região de Operação/Tensão de Operação por Modo de Operação

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Modo de operação | Região de operação | Tensão de operação |
| Buck |  |  |
| Buck-Boost |  |  |
| Boost |  |  |

**5.3.1 Regiões de operação**

A partir das informações obtidas anteriormente, é possível calcular o ciclo de trabalho para cada combinação de entradas e saídas, e construir um gráfico de contorno que representa as regiões de operação, facilitando a visualização das fronteiras entre elas, conforme a Figura X.

Figura X: Gráfico de Contorno das Regiões de Operação



Fonte: Autor (Mathematica)

Para visualizar a profundidade, pode-se converter os eixos em uma variável única que represente tensão de entrada sobre tensão de saída no eixo horizontal e representar o Duty Cycle no eixo vertical, conforme a Figura X.

Figura X: Gráfico do Duty Cycle por Região de Operação

A graph with colored lines

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Mathematica)

Vale comentar que, pela tensão máxima ter sido considerada 55 V, o valor de Duty Cycle teórico não atinge o valor de 0.8 na região Boost.

**5.4 Cálculo dos Componentes**

Novas considerações:

**5.4.1 Buck**

A partir das Equações X e Y.

**5.2 Buck-Boost**

A partir das Equações X e Y.

**5.3 Boost**

A partir das Equações X e Y.

**5.4 Verficação**

Com os componentes de cada modo de operação obtidos, utiliza-se aqueles com o maior valor para cobrir todo o funcionamento do sistema.

Novas considerações:

Calcula-se o ripple máximo da corrente do indutor e da tensão de saída com base nas equações anteriores.

**5.4.1 Buck**

**5.4.2 Buck-Boost**

**5.4.2 Boost**

Por fim, verificou-se que os valores estão dentro do considerado para esse design.

**5.4.3 Resumo Final**

As informações adquiridas do design até o momento são resumidas na Tabela X a seguir.

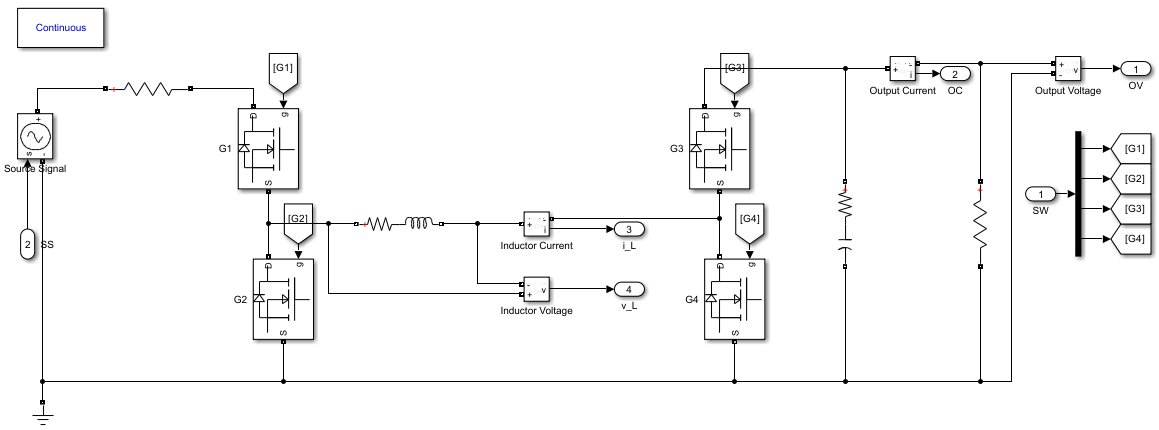
Tabela X: Gráfico do Duty Cycle por Região de Operação

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Modo de operação | Faixa de operação (V) | Duty Cycle | Vi/Vo | (A) | (V) |
| Buck |  |  |  |  |  |
| Buck-Boost |  |  |  |  |  |
| Boost |  |  |  |  |  |

**5.5 Implementação Simulink**

O circuito base do conversor foi implementado em um subsistema no Simulink, conforme ilustrado na Figura X.

Figura X: Subsistema do Conversor Buck-Boost Implementada



Fonte: Autor (Simulink)

O subsistema possui duas entradas: o sinal de fonte (Source Signal - SS) e as quatro chaves multiplexadas (SW). Suas quatro saídas são: Tensão de Saída (Output Voltage - OV), Corrente de Saída (Output Current - OC), Tensão do Indutor (Inductor Voltage - v\_L) e Corrente do Indutor (Inductor Current - i\_L). Os quatro modos de funcionamento do conversor são definidos pelo estado das quatro chaves e seus respectivos ciclos de trabalho (Duty Cycle). Uma vez que existem quatro modos distintos, são necessários dois bits para representá-los. A Tabela X, a seguir, sumariza a lógica de ativação de cada chave, utilizando A e B como entradas lógicas.

Tabela X: Lógica de Ativação dos Switches

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mode | AB | SW1 | SW2 | SW3 | SW4 |
| Buck | 00 | D | 1 - D | 1 | 0 |
| Buck-boost | 01 | D | 1 - D | 1 - D | D |
| Boost | 11 | 1 | 0 | 1 - D | D |
| Off | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |

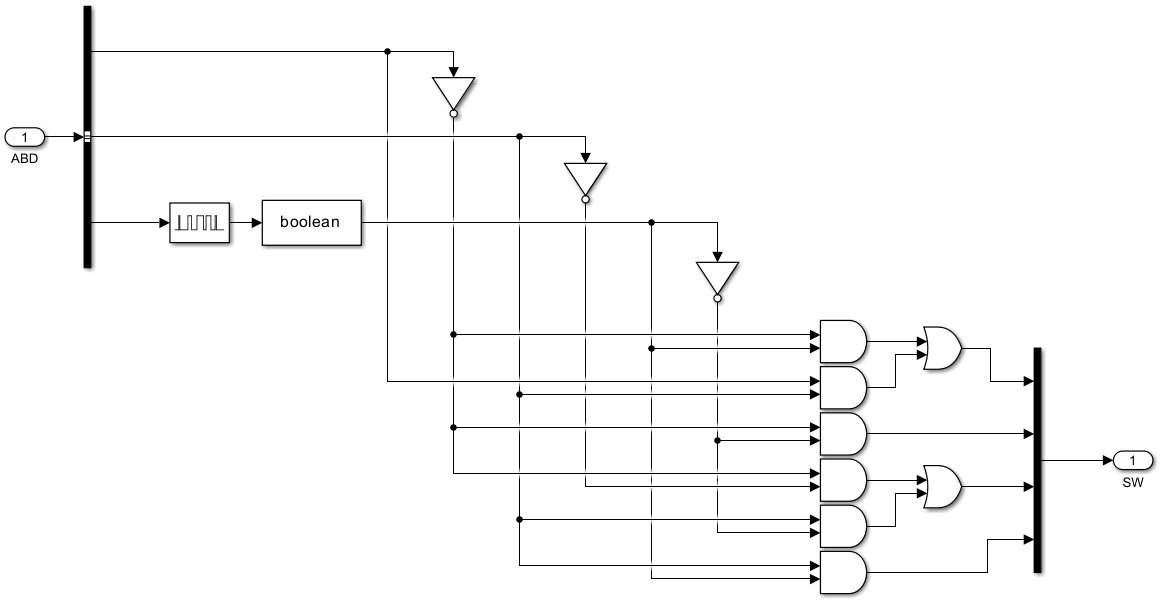
Com base nos princípios de sistemas digitais, é possível simplificar a lógica de acionamento de cada chave, resultando nas equações apresentadas a seguir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

Com base nas relações apresentadas, é possível implementar um subsistema no Simulink para controlar o funcionamento de cada chave, utilizando as entradas A, B e D, conforme a Figura X.

Figura X: Subsistema de Ativação dos Switches Implementada



Fonte: Autor (Simulink)

O modo de operação, tanto o atual quanto o futuro, é determinado pela relação entre a Tensão de Entrada e a Tensão de Referência. Essa relação é detalhada na Tabela X a seguir.

Tabela X: Lógica do Modo de Operação

|  |  |
| --- | --- |
| Modo de operação | Vi/Vo |
| Buck |  |
| Buck-Boost |  |
| Boost |  |

A Tabela X indica que o modo de funcionamento será Buck quando a Tensão de Entrada exceder 125% da Tensão de Referência. Por outro lado, o modo de funcionamento será Boost quando a Tensão de Entrada estiver abaixo de 80% da Tensão de Referência. Essa relação pode ser expressa conforme a equação lógica abaixo.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

A Tabela X, a seguir, sumariza a lógica dos modos de funcionamento conforme as saídas lógicas da Equação X.

Tabela X: Lógica de Escolha dos Modos de Operação

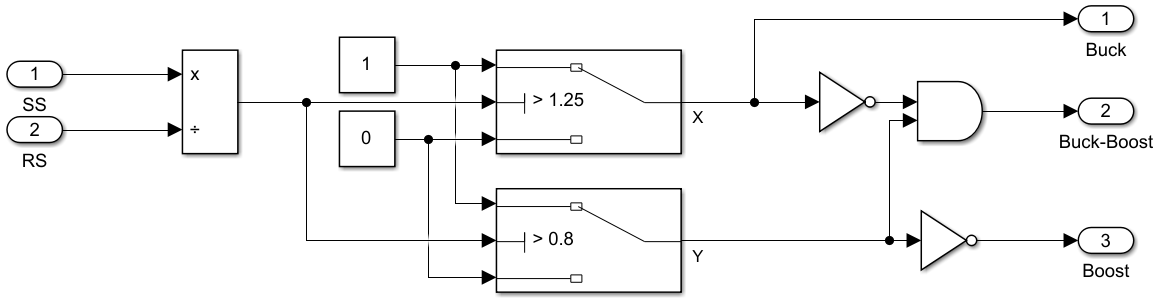
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| XY | Buck | Buck-Boost | Boost |
| 00 | 0 | 0 | 1 |
| 01 | 0 | 1 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | X | X | X |

Com a aplicação de conceitos de sistemas digitais, é possível simplificar essa relação, resultando nas equações lógicas apresentadas a seguir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

A lógica descrita pode ser implementada no Simulink por meio do subsistema ilustrado na Figura X.

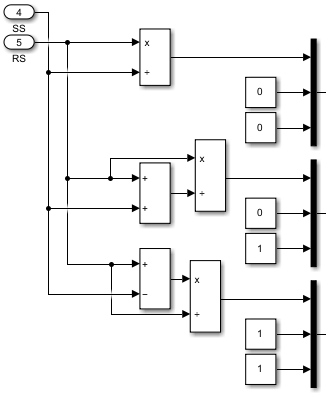
Figura X: Subsistema de Escolha de Modos Implementada



Fonte: Autor (Simulink)

Com a determinação do modo de operação, o próximo passo é o cálculo do Ciclo de Trabalho (Duty Cycle). Embora cada modo possua seu Duty Cycle calculado, apenas o valor correspondente ao modo ativo será empregado no acionamento das chaves. Conforme previamente estabelecido nas Equações X, Y e Z, o cálculo requer apenas a Tensão de Entrada e a Tensão de Referência, conforme a Figura X.

Figura X: Equações do Ciclo de Trabalho Implementada



Fonte: Autor (Simulink)

Os valores de A e B, previamente definidos na Tabela X, são anexados juntamente ao respectivo valor de D por meio de um multiplexador (MUX). Para determinar qual valor será utilizado, o resultado do subsistema anterior é empregado em conjunto com comparadores lógicos, direcionando o valor para as variáveis A, B e D através de um demultiplexador (DEMUX), conforme ilustrado abaixo.

Figura X: Direcionamento dos Valores A, B e D Implementada

A diagram of a computer program

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Simulink)

Dado que apenas um dos comparadores estará ativo em determinado momento, A e B podem ser calculados por meio de uma porta OR, enquanto D pode ser obtido por uma soma simples, conforme a Figura X

Figura X: Valor Final de A e B Implementada

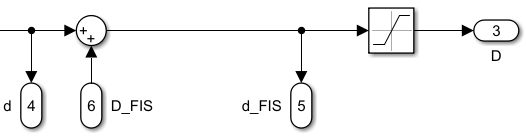
A black and white diagram

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Simulink)

Para fins de controle, a variável D pode ser somada a uma entrada externa (D\_FIS), conforme a Figura X. Adicionalmente, o ciclo de trabalho (Duty Cycle) é limitado entre 0.2 e 0.8.

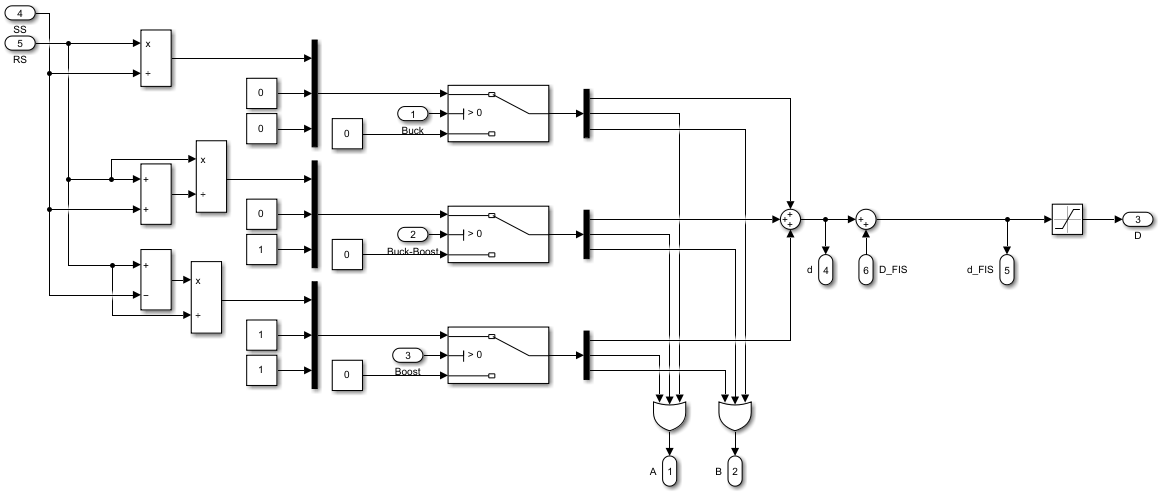
Figura X: Valor Final de D Implementada



Fonte: Autor (Simulink)

Desse modo, conforme ilustrado na Figura X, obtém-se o subsistema responsável pela determinação da variável D do sistema.

Figura X: Subsistema Final para o Cálculo do Ciclo de Trabalho Implementada



Fonte: Autor (Simulink)

Com as variáveis A, B e D devidamente determinadas, o funcionamento das chaves (Switches) também é definido, tornando o sistema apto para operação em malha aberta.

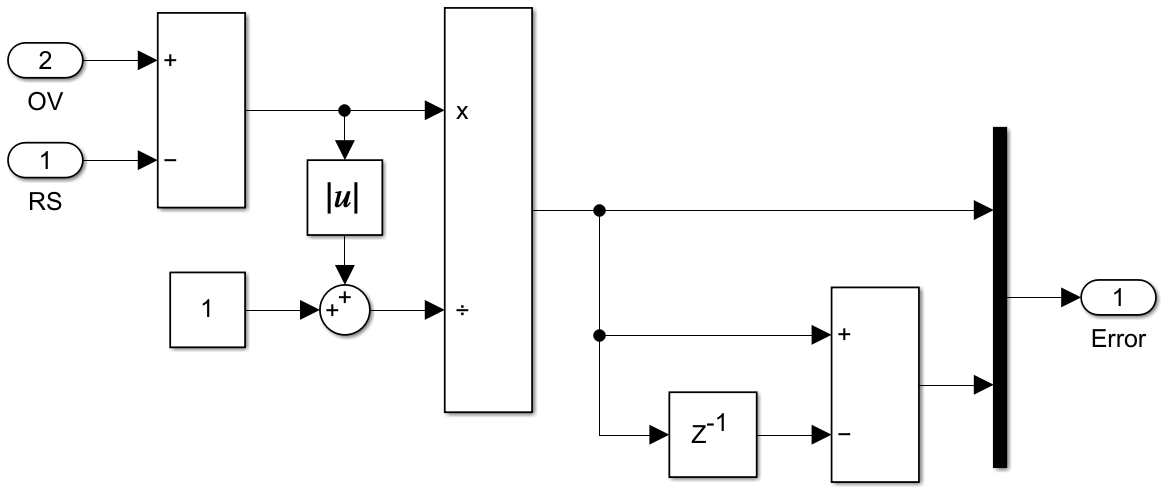
Para a visualização do erro e de sua variação, é necessário um subsistema. O erro pode ser caracterizado pela diferença entre a Tensão de Saída e a Tensão de Referência, e sua variação, pela diferença entre o erro atual e o anterior, considerando o uso de valores discretos. Para otimizar a visualização do desempenho, será empregado um erro normalizado, conforme as equações a seguir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |
|  | (X) |

Onde:

O subsistema implementado no Simulink pode ser visualizado na Figura X abaixo.

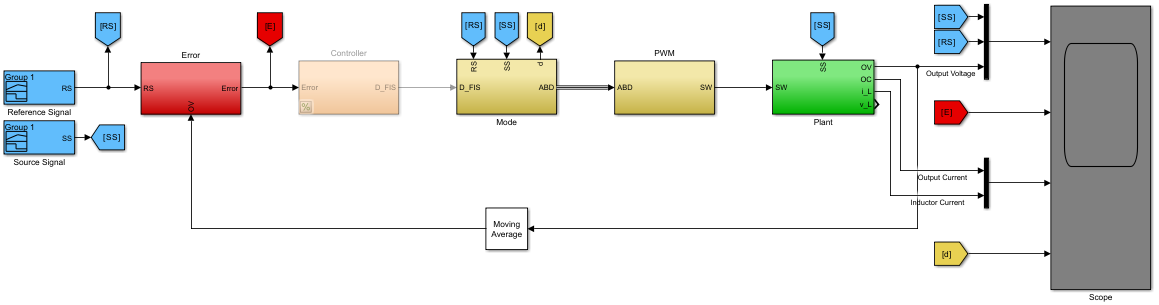
Figura X: Subsistema do Erro Normalizado Implementado



Fonte: Autor (Simulink)

O resultado final do sistema em malha aberta, bem como a visualização do erro obtida a partir da união dos subsistemas, pode ser observado na Figura X.

Figura X: Sistema em Malha Aberta Implementado



Fonte: Autor (Simulink)

Agora é possível realizar uma simulação contemplando todas as combinações possíveis de tensão de entrada e saída, descritas a seguir.

A tensão de entrada (SS), conforme a Figura X, consistirá em duas rampas definidas pela Equação X abaixo.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

Figura X: Gráfico da Tensão de Entrada (SS)

A graph with a line

AI-generated content may be incorrect.

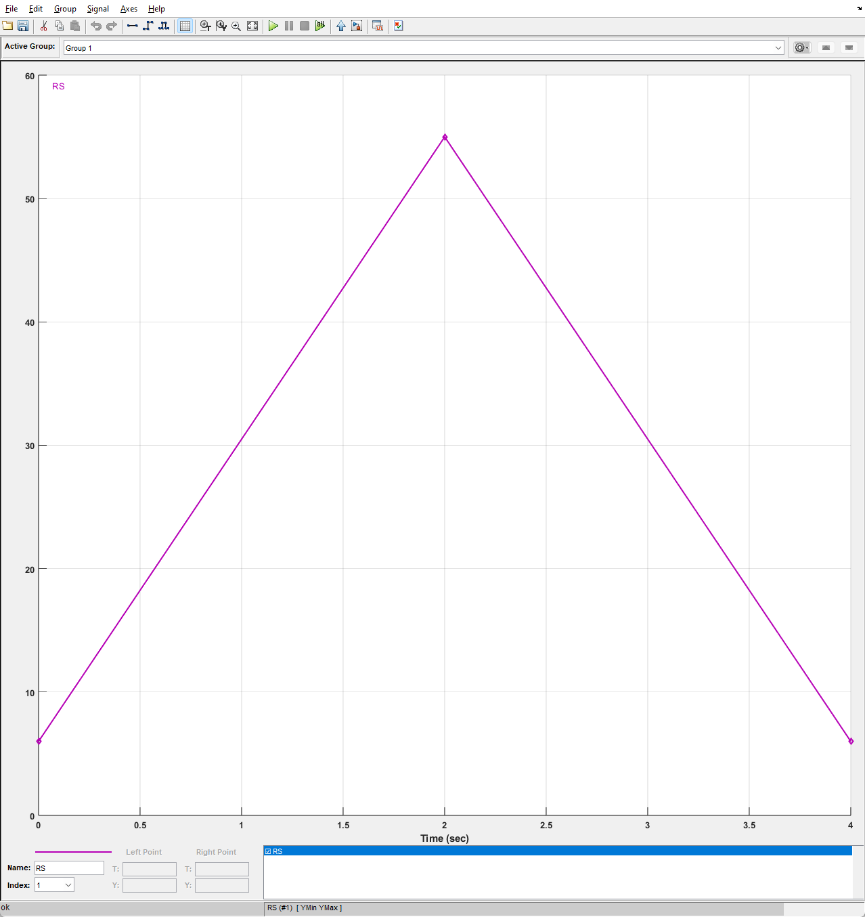
Fonte: Autor (Simulink)

O sinal de referência (RS) consistirá em duas rampas definidas pela Equação X abaixo.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

Figura X: Gráfico da Tensão de Referência (RS)



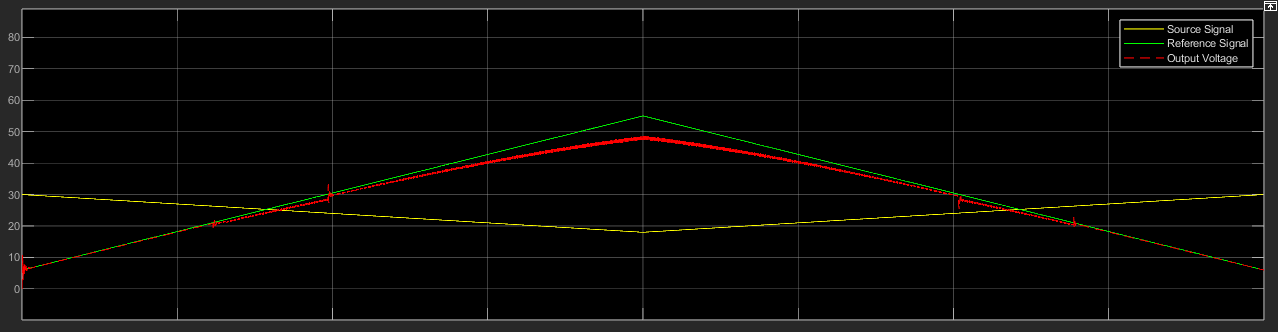
Fonte: Autor (Simulink)

**5.5.1 Simulação em Malha Aberta Simulink**

A simulação do sistema teve uma duração total de 4 segundos.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Source Signal (SS) em amarelo, Reference Signal (RS) em verde e Output Voltage (OV) em vermelho para comparação, resultante do sistema em malha aberta.

Figura X: Gráfico Resultante da Tensão de Saída do Sistema em Malha Aberta

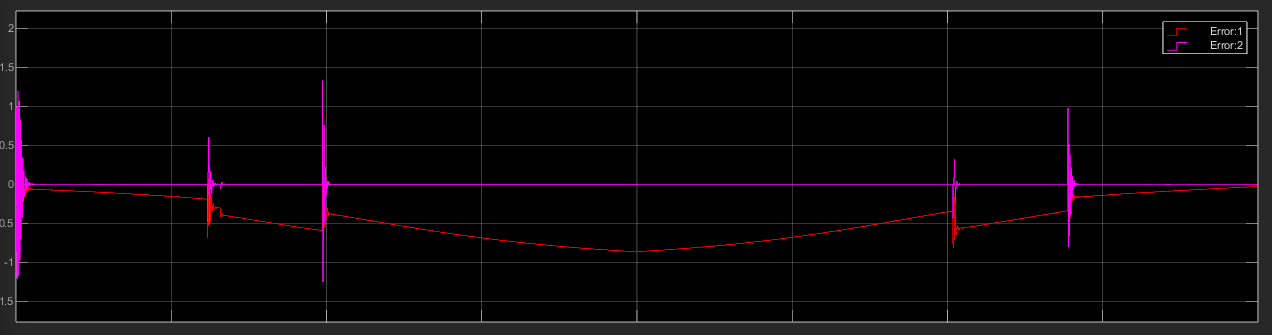


Fonte: Autor (Simulink)

É possível identificar facilmente os pontos de transição do modo de operação, dada a ausência de histerese. Também se observa um erro na tensão de saída (representada em vermelho), atribuível à falta de um compensador.

A Figura X ilustra a curva dos sinais do Erro em vermelho e Variação do Erro em magenta, resultante do sistema em malha aberta.

Figura X: Gráfico Resultante do Erro e Variação do Erro do Sistema em Malha Aberta

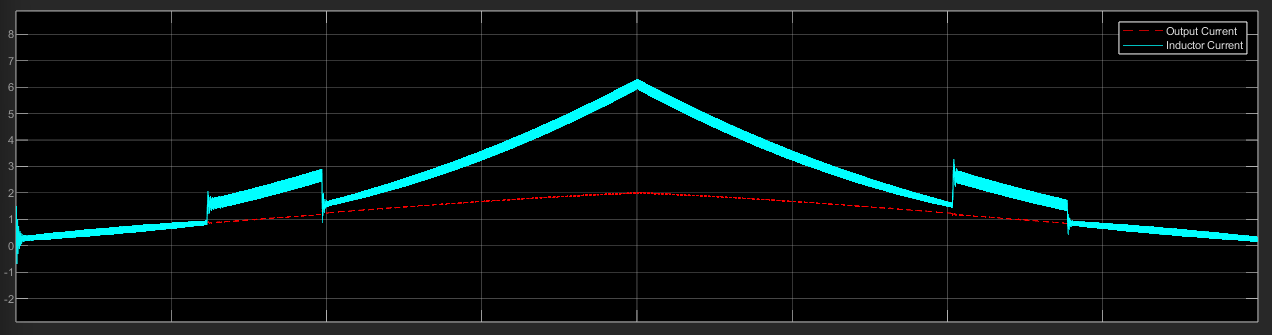


Fonte: Autor (Simulink)

É perceptível uma taxa de variação inicial do erro (na cor magenta) provocada pela energização do sistema até sua entrada em regime estacionário, e subsequentes variações durante as alternâncias de modo de operação. O erro (na cor vermelha) sinaliza que o sistema não atinge e opera abaixo da tensão de referência, justificando-se tal comportamento pela ausência de um compensador.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Inductor Current (IC) em ciano e Output Current (OC) em vermelho, resultante do sistema em malha aberta.

Figura X: Gráfico Resultante da Corrente de Saída do Sistema em Malha Aberta

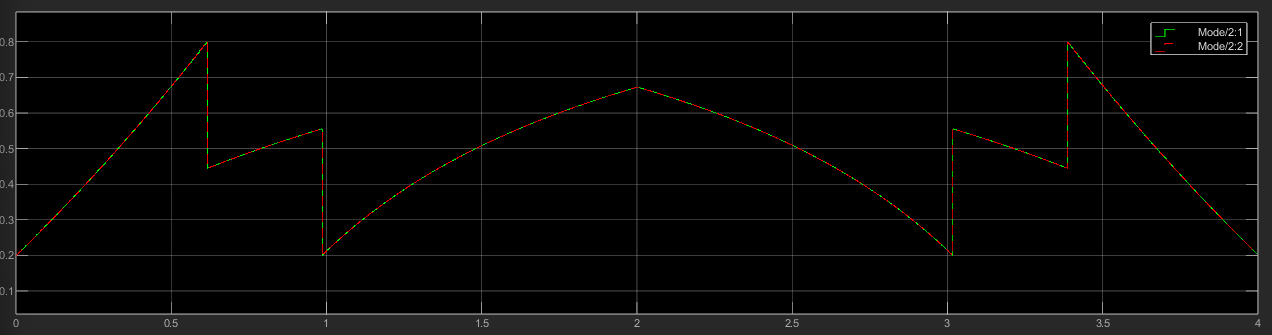


Fonte: Autor (Simulink)

A corrente do indutor manteve-se abaixo de 6 A, sem considerar o ripple de 0.6 A. A corrente de saída, por sua vez, permaneceu inferior a 2 A.

A Figura X ilustra a curva dos sinais do Ciclo de Trabalho em verde e Ciclo de Trabalho Compensado em vermelho, resultante do sistema em malha aberta.

Figura X: Gráfico Resultante do Ciclo de Trabalho do Sistema em Malha Aberta



Fonte: Autor (Simulink)

O valor do ciclo de trabalho (Duty Cycle) está em conformidade com o cálculo do modo de operação e se mantém dentro da faixa previamente estabelecida de 0.2 a 0.8. O valor de controle, por sua vez, acompanha esses mesmos valores devido à ausência de um compensador que será implementado a seguir.

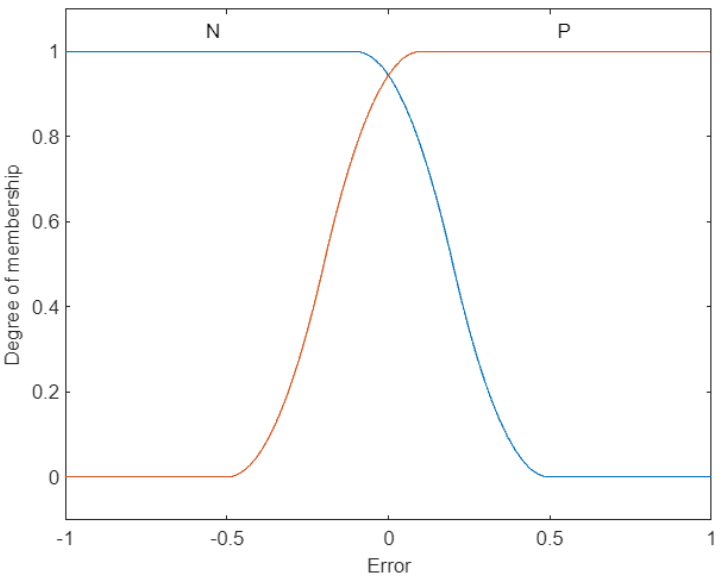
**5.5.2 Controle**

Um Sistema de Inferência Fuzzy (FIS) será empregado no MATLAB como compensador para corrigir o erro do sistema. Sabendo que o comportamento do sistema é dependente do Ciclo de Trabalho (Duty Cycle), este valor será compensado e utilizado como variável manipulada.

A partir do subsistema de erro, constata-se que sua variação ocorre entre -1 e 1. Um erro negativo indica que a Tensão de Saída (variável controlada) está abaixo da Tensão de Referência, requerendo uma compensação positiva no Duty Cycle, enquanto um erro positivo sinaliza que a tensão está acima, necessitando de uma compensação negativa. Observa-se também que a Variação do Erro obtida na simulação permanece próximo de zero, indicando que o sistema só possui erro de estado estacionário e que não há oscilações.

Com base nessas informações, um FIS será desenvolvido somente com uma entrada, denominada 'Error', e uma saída, denominada 'Mode'. Para a definição dos pesos das entradas, serão utilizadas funções de pertinência no formato Z para erros negativos e no formato S para erros positivos, conforme a Figura X. Pelo cálculo do erro utilizado ser normalizado, as funções de pertinência estão com um desvio para suavizar o peso de erros menores.

Figura X: Funções de Pertinência da Entrada do FIS



Fonte: Autor (MATLAB)

Para determinar o ajuste na saída, será empregada uma função de pertinência em formato de sino para saídas negativas e positivas, conforme a Figura X.

Figura X: Funções de Pertinência da Saída do FIS

A diagram of a normal distribution

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (MATLAB)

Assim, obtém-se a superfície da Figura X que descreve o comportamento do FIS.

Figura X: Superfície de Comportamento do FIS

A graph with a line

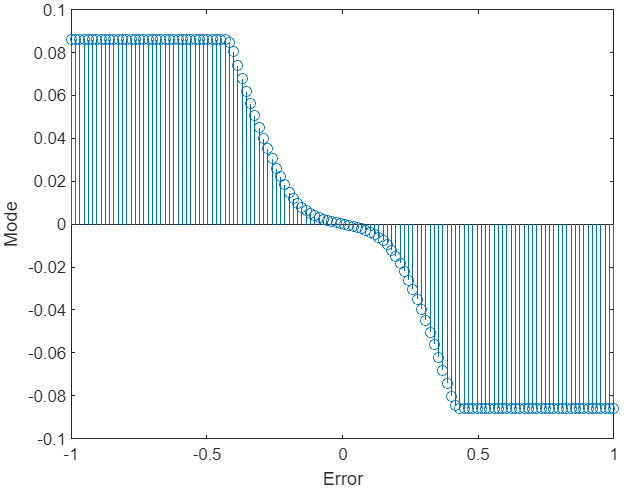
AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (MATLAB)

Analisando o gráfico, verifica-se que erros próximos de zero resultarão em pequenos ajustes, enquanto erros próximos de -0.5 e 0.5 produzirão ajustes máximos. Tal comportamento compensa a natureza do erro normalizado, que apresenta um crescimento acentuado à medida que se distancia de zero.

Para determinar a saída com base na superfície previamente definida, será criada uma tabela verdade que servirá como consulta, contendo 128 pontos amostrados da superfície do FIS conforme a Figura X.

Figura X: Superfície de Comportamento do FIS Amostrado



Fonte: Autor (MATLAB)

Assim, é possível criar o subsistema de controle no Simulink que aplica a tabela verdade para compensar o ciclo de trabalho (Duty Cycle) no sistema, conforme a Figura X abaixo.

Figura X: Subsitema do FIS Implementado

A diagram of a system

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (MATLAB)

Para prevenir ajustes instantâneos e instabilidades no sistema, um integrador discreto foi adicionado, garantindo uma transição suave até o ponto de ajuste. Adicionalmente, um saturador é empregado para evitar o acúmulo de esforço no integrador.

Por fim, na Figura X, tem-se o sistema completo implementado no Simulink.

Figura X: Sistema em Malha Fechada Implementado

A diagram of a block diagram

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Simulink)

**5.5.3 Simulação em Malha Fechada Simulink**

A simulação seguirá as mesmas condições anteriores, porém com a adição do controlador.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Source Signal (SS) em amarelo, Reference Signal (RS) em verde e Output Voltage (OV) em vermelho para comparação, resultante do sistema em malha fechada.

Figura X: Gráfico Resultante da Tensão de Saída do Sistema em Malha Fechada

A graph with red and yellow lines

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Simulink)

É possível identificar facilmente os pontos de transição do modo de operação, dada a ausência de histerese. Também se observa que a tensão de saída (representada em vermelho), seguiu a tensão de referência devido a adição do compensador.

A Figura X ilustra a curva dos sinais do Erro em vermelho e Variação do Erro em magenta, resultante do sistema em malha fechada.

Figura X: Gráfico Resultante do Erro e Variação do Erro do Sistema em Malha Fechada

A graph with red lines on it

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Simulink)

Observa-se uma taxa de variação inicial do erro (curva magenta) devido à ativação do sistema até o alcance de seu estado estacionário, bem como outras variações durante as transições de modo de operação. O erro (curva vermelha) indica que a saída do sistema se aproxima da tensão de referência, mas não atinge exatamente zero. Considerando a utilização de um erro normalizado, pode-se deduzir que o erro é bem pequeno, conforme observado na Figura X, onde a tensão de saída está praticamente em cima da tensão de referência.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Inductor Current (IC) em ciano e Output Current (OC) em vermelho, resultante do sistema em malha fechada.

Figura X: Gráfico Resultante da Corrente de Saída do Sistema em Malha Fechada

A graph with a blue line and red line

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Simulink)

A corrente do indutor manteve-se abaixo de 8 A, desconsiderando o ripple de 0.6 A. A corrente de saída, por sua vez, permaneceu inferior a 2 A. Infere-se, portanto, que a ação do compensador resultou em um aumento na corrente de entrada.

A Figura X ilustra a curva dos sinais do Ciclo de Trabalho em verde e Ciclo de Trabalho Compensado em vermelho, resultante do sistema em malha fechada.

Figura X: Gráfico Resultante do Ciclo de Trabalho do Sistema em Malha Fechada

A graph with a line and a dotted line

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Simulink)

O valor do Ciclo de Trabalho (Duty Cycle) está em conformidade com o cálculo do modo de operação e se mantém dentro da faixa previamente estabelecida de 0.2 a 0.8. O valor controlado foi compensado e pode ser observado acima da curva verde principalmente na seção correspondente ao modo de operação Buck-Boost.

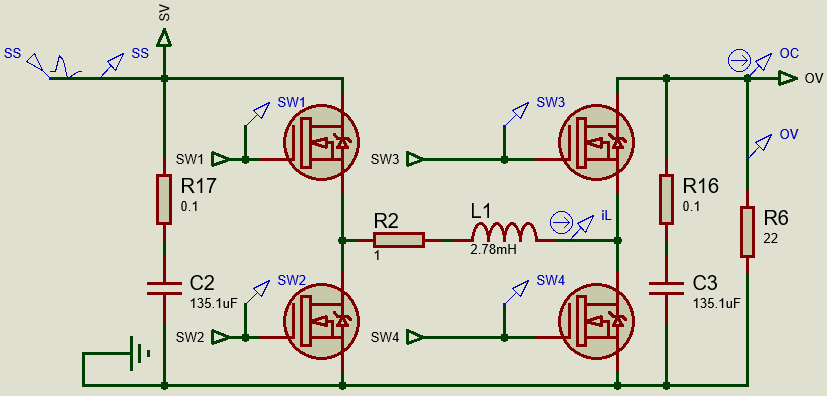
Em virtude da correção, verificou-se um incremento na corrente de entrada, o qual deverá ser devidamente levado em consideração no design do projeto.

**5.6 Implementação Proteus (ATmega328P)**

Com o objetivo de validar e verificar o comportamento do conversor Buck-Boost em um ambiente mais próximo da realidade prática, esta seção detalha a implementação do sistema em um ambiente de simulação e desenvolvimento de hardware. Para a concepção e simulação do circuito eletrônico, será utilizada a ferramenta Proteus. Paralelamente, a plataforma Arduino, com o microcontrolador ATmega328P, será empregada para o desenvolvimento e teste do firmware.

O circuito base do conversor foi implementado no Proteus, conforme ilustrado na Figura X..

Figura X: Conversor Buck-Boost Proteus



Fonte: Autor (Proteus)

O circuito apresenta cinco entradas: o sinal de fonte (SS) e as quatro chaves (SW). Suas duas saídas são a Tensão de Entrada (SV) e a Tensão de Saída (OV), além de pontos de prova para a Corrente do Indutor (iL) e a Corrente de Saída (OC).

Para o chaveamento, são utilizados MOSFETs IRLZ44N, enquanto os demais componentes são genéricos e empregam valores teóricos.

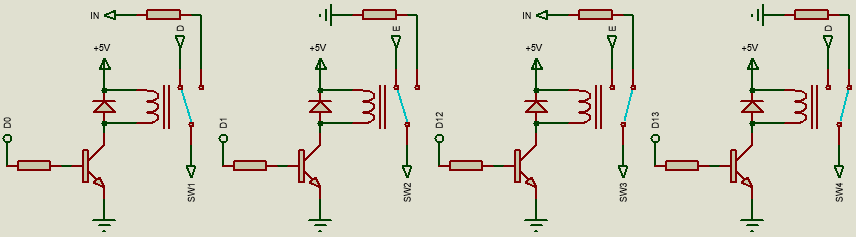
Os quatro modos de funcionamento do conversor são determinados pelo estado das quatro chaves e seus respectivos ciclos de trabalho (Duty Cycle). Para implementar a lógica de ativação das chaves, um circuito de chaveamento é essencial.

Conforme a Tabela X, tem-se que:

* SW1 alterna entre 1 e D;
* SW2 alterna entre 0 e 1 - D;
* SW3 alterna entre 1 e 1 - D;
* SW4 alterna entre 0 e D.

Com isso em mente, o circuito de chaveamento da Figura X é implementado para selecionar entre as entradas com base na lógica controlada pelo microcontrolador. Isso permite a fácil alteração do modo de funcionamento por meio de quatro pinos do microcontrolador.

Figura X: Circuito Lógico de Ativação das Chaves



Fonte: Autor (Proteus)

Nesta implementação, o PWM complementar é representado por E em vez de (1−D).

A lógica do modo de operação, que reflete a Tabela X, é determinada pela relação entre a Tensão de Entrada e a Tensão de Saída. Para controlar os relays, o código C a seguir é aplicado, seguindo o modelo teórico desenvolvido no Simulink.

|  |
| --- |
| // Operation mode logic variable  hold = source/ref;  // Buck Mode  if(hold > 1.25){  a = 0, b = 0; // Logic inputs  duty = ref/source; // Duty calculation  PORTB &= ~(1<<PB4) & ~(1<<PB5); // SW3 and SW4 relay control  PORTD |= (1<<PD0) | (1<<PD1); // SW1 and SW2 relay control  }  .  .  .  OCR1A = 1599\*duty; // Base PWM  OCR1B = OCR1A; // Complement PWM |

A lógica de controle inicia-se com a divisão da tensão de entrada pela tensão desejada, cujo resultado é comparado com os valores indicados na Tabela X. Se o valor obtido for maior que 1.25, o ciclo de trabalho para o modo Buck é calculado. Em seguida, os relays são acionados para configurar o chaveamento adequado dos switches. As portas PWM (OCR1x) são atualizadas com o valor calculado, o qual será detalhado a seguir.

O PWM base e complementar, direcionado aos relays, é gerado pelo Timer1 do ATmega328P, utilizando os pinos PB1 (D9) e PB2 (D10), designados para PWM. Isso é feito por meio da ativação dos registradores do timer em uma configuração específica, conforme o datasheet do microcontrolador. O código a seguir exemplifica uma configuração básica desse tipo de PWM.

|  |
| --- |
| void pwm\_setup(){  // Define pins as output  DDRB |= (1<<PB1) | (1<<PB2); // OC1A (PB1 = D9), OC1B (PB2 = D10)    // Fast PWM with ICR1 as TOP (Mode 14)  TCCR1A = (1<<COM1A1) | (1<<COM1B1) | (1<<COM1B0) | (1<<WGM11);  TCCR1B = (1<<WGM13) | (1<<WGM12) | (1<<CS10); // No prescaler    // ICR1 = (F\_CPU/(prescaler\*frequency)) - 1  ICR1 = 1599; // ICR1 = (16000000/(1\*10000)) - 1 = 1599    // Set initial duty cycle  OCR1A = 0;  OCR1B = 0;  } |

Inicialmente, os pinos do PWM são configurados como saída. Em seguida, os registradores são acionados de modo específico para configurar o modo de operação do timer. A faixa de contagem superior é calculada a partir da fórmula especificada e aplicada ao ICR1, o que determina o número de ciclos de máquina por período, equivalente à frequência desejada.

Por fim, um valor inicial para OCR1A é aplicado, definindo a porcentagem de tempo em que a saída do pino estará ativa. O valor máximo de 1599 corresponde a 100% de ciclo de trabalho. No caso de OCR1B, esse valor determina a porcentagem de tempo em que a saída do pino estará desativada, caracterizando um PWM complementar.

Devido à natureza dos MOSFETs de potência utilizados, eles exigem a aplicação de Gate Drivers. Se um microcontrolador (com saída de 3.3V ou 5V) tentar acionar esses MOSFETs diretamente, eles não ligarão completamente. Isso resultaria em dissipação excessiva de calor e falha prematura do componente, mesmo em correntes baixas. O gate driver é, portanto, responsável por elevar a tensão do sinal de controle para o nível adequado, garantindo o chaveamento eficiente.

Na implementação do Proteus, por simplicidade de simulação, o chaveamento do microcontrolador será elevado por meio de dois MOSFETs, conforme indicado na Figura X.

Figura X: Gate Drivers Simplificado no Proteus

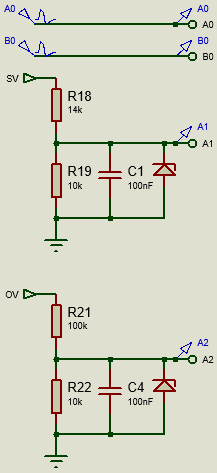
A diagram of a circuit

AI-generated content may be incorrect.

Fonte: Autor (Proteus)

Para o cálculo do erro, é fundamental medir as tensões de entrada e saída do conversor. Essa medição será realizada por meio de um circuito divisor de tensão, conforme ilustrado na Figura X.

Figura X: Divisor de Tensão para Realimentação no Proteus



Fonte: Autor (Proteus)

O circuito é projetado para escalonar a faixa de tensão medida para entre 0 e 5 V, o que é ideal para a leitura pelos pinos analógicos do microcontrolador. A relação dos resistores é calculada de acordo com a Equação X.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (X) |

Onde:

Com base na Equação X, e considerando que a tensão de saída desejada é de 5 V e a tensão de entrada opera na faixa de 18 V a 30 V (com uma variação de 12 V), e assumindo um valor de R2 igual a 10 kΩ, a relação dos resistores pode ser determinada:

O mesmo cálculo é feito para a tensão de saída, e o código a seguir recebe a leitura analógica dos pinos A1 e A2 e os decodifica para valores reais.

|  |
| --- |
| void sensor\_sub(){  x[0] = le\_ADC(0); // Read analogic pin A0  x[1] = le\_ADC(1); // Read analogic pin A1  x[2] = le\_ADC(2); // Read analogic pin A2    // Decodifies true range of variables  ref = (x[0]\*49)/1023.0 + 6;  source = (x[1]\*12)/1023.0 + 18;  output = (x[2]\*55)/1023.0;  } |

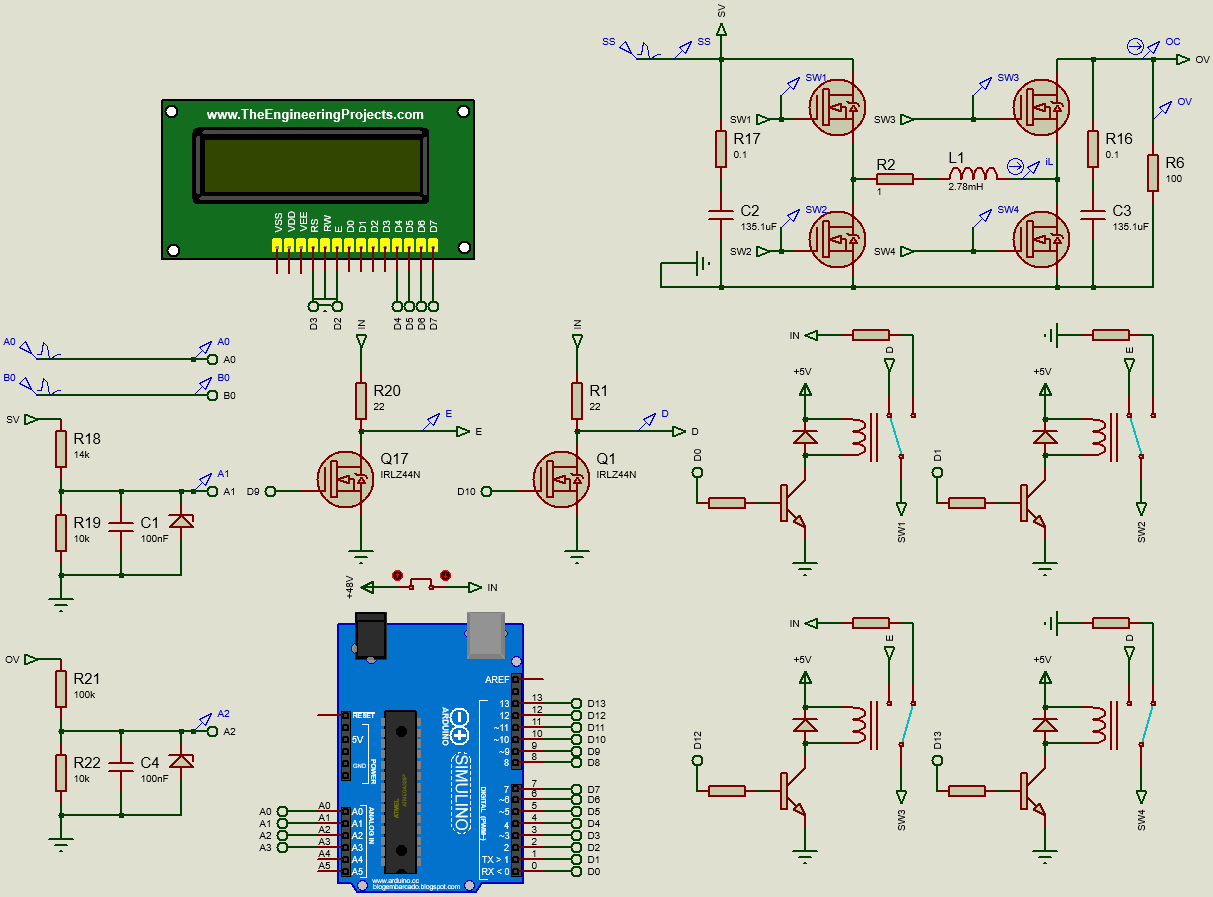
A tensão de referência foi coloca a parte no pino A0, conforme a Figura X, utilizando o Generator Mode, para facilmente modificar a tensão de referência na simulação.

Com os valores lidos, o erro normalizado pode ser calculado pelo microcontrolador através do código a seguir.

|  |
| --- |
| void error\_sub(){  // Normalized error calculation  error = (output - ref)/(fabs(output - ref) + 1);  } |

O resultado final do sistema implementado no Proteus, bem como a adição de um LCD, pode ser observado na Figura X.

Figura X: Sistema Implementado no Proteus

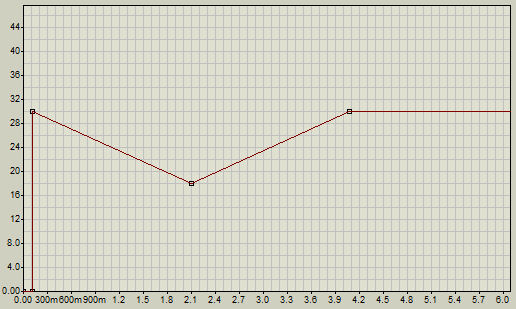


Fonte: Autor (Proteus)

Agora é possível realizar uma simulação que contemple todas as combinações possíveis de tensão de entrada e saída, as quais serão descritas a seguir.

A tensão de entrada (SS), conforme ilustrado na Figura X, consistirá em duas rampas definidas pela Equação X.

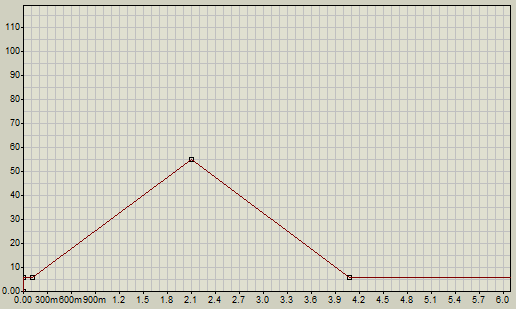
Figura X: Gráfico da Tensão de Entrada (Proteus)



Fonte: Autor (Proteus)

O sinal de referência (A0) consistirá em duas rampas definidas pela Equação X.

Figura X: Gráfico da Tensão de Referência (Proteus)



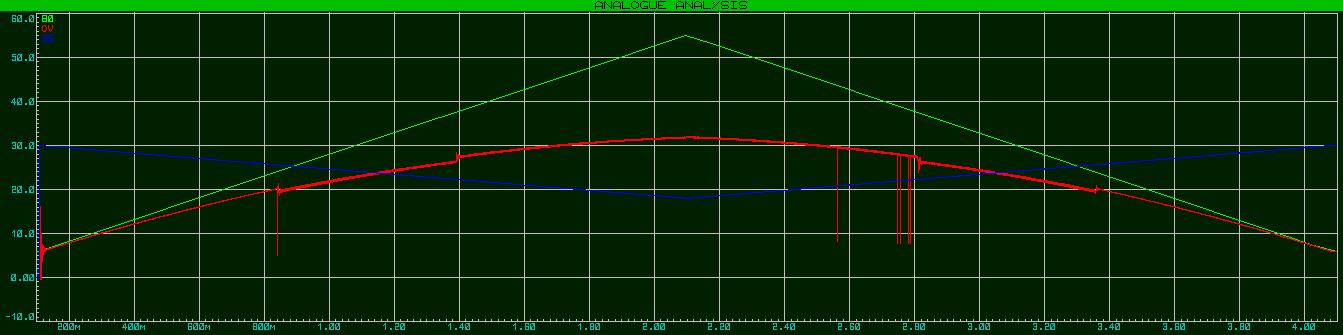
Fonte: Autor (Simulink)

**5.6.1 Simulação em Malha Aberta Proteus**

A simulação do sistema teve uma duração total de 4 segundos.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Source Signal (SS) em azul, Reference Signal (B0) em verde e Output Voltage (OV) em vermelho para comparação, resultante do sistema em malha aberta.

Figura X: Gráfico Resultante da Tensão de Saída do Sistema em Malha Aberta no Proteus

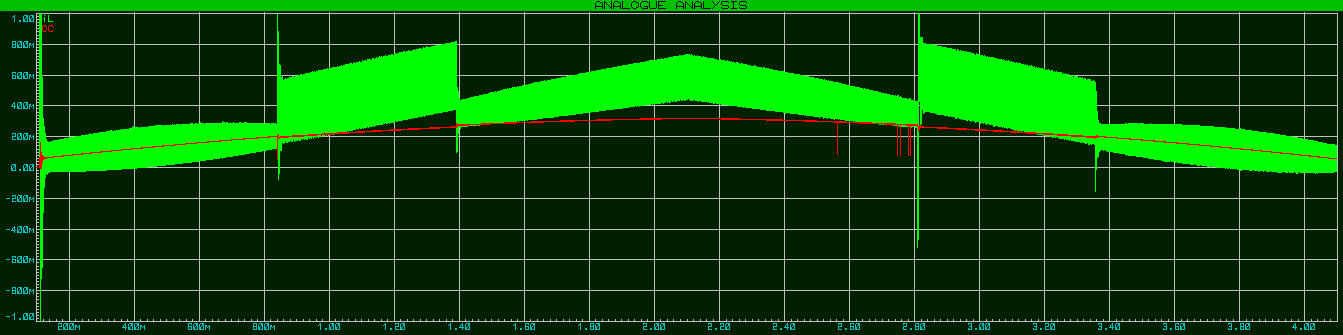


Fonte: Autor (Proteus)

É fácil identificar os pontos de transição do modo de operação, pois não há histerese. Também observamos um erro na tensão de saída (representada em vermelho), que podemos atribuir à ausência de um compensador.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Inductor Current (iL) em verde e Output Current (OC) em vermelho, resultante do sistema em malha aberta.

Figura X: Gráfico Resultante da Corrente de Saída do Sistema em Malha Aberta no Proteus



Fonte: Autor (Proteus)

A corrente do indutor se manteve abaixo de 6 A, desconsiderando um ripple de 0.6 A. A corrente de saída, por sua vez, permaneceu inferior a 2 A. Como o sistema projetado possui muitos pontos de operação e é não-linear, a faixa de corrente do sistema dependerá da carga aplicada.

**5.5.2 Controle**

Um Sistema de Inferência Fuzzy (FIS) será empregado no microcontrolador como compensador para corrigir o erro do sistema. Uma vez que o comportamento do sistema é dependente do Ciclo de Trabalho (Duty Cycle), este valor será compensado e utilizado como variável manipulada.

A partir da Superfície de Comportamento do FIS Amostrado (Figura X), são obtidos os dados necessários para a aplicação de uma tabela verdade em código. Um exemplo de trecho dessa tabela, formada pela superfície, é ilustrado na Tabela X.

Tabela X: Lógica de Escolha dos Modos de Operação

|  |  |
| --- | --- |
| Error | Mode |
| -1 | 0.0859190055666735 |
|  |  |
| -0.0393700787401575 | 0.00108303363502077 |
| -0.0236220472440945 | 0.000609177093823220 |
| -0.00787401574803150 | 0.000208760625869891 |
| 0.00787401574803150 | -0.000208760625869902 |
| 0.0236220472440945 | -0.000609177093823263 |
| 0.0393700787401575 | -0.00108303363502081 |
| 0.0551181102362205 | -0.00158727697108695 |
|  |  |
| 1 | -0.0859190055666735 |

A coluna "Erro" na tabela de lookup representa o eixo horizontal da superfície de comportamento e atua como a entrada para o compensador. Já a coluna "Mode" corresponde ao eixo vertical e à saída do compensador. Para implementar essa lógica em código, utiliza-se o tipo de dado estrutura em C, como exemplificado a seguir.

|  |
| --- |
| // Define a structure for error-output pairs  typedef struct{  float error;  float output;  }error\_lu\_output;  // Define your lookup table  const error\_lu\_output lut[] = {  {-1.000000, 0.085919},  {-0.984252, 0.085919},  ...,  {0.984252, -0.085919},  {1.000000, -0.085919}  }; |

Com a tabela verdade definida, o próximo passo é identificar em qual intervalo de valores o erro se situa na tabela. Em seguida, uma interpolação é realizada para determinar o valor mais adequado, suavizando os saltos discretos e contribuindo para a precisão do controle. Esse processo de interpolação será incorporado ao código final do sistema.

Para prevenir ajustes instantâneos e instabilidades no sistema, um integrador simples será adicionado. Isso garante uma transição suave até o ponto de ajuste desejado. Sua implementação pode ser realizada de forma direta com o código a seguir.

|  |
| --- |
| hold = lu\_output\*0.01;  fis\_duty += hold; |

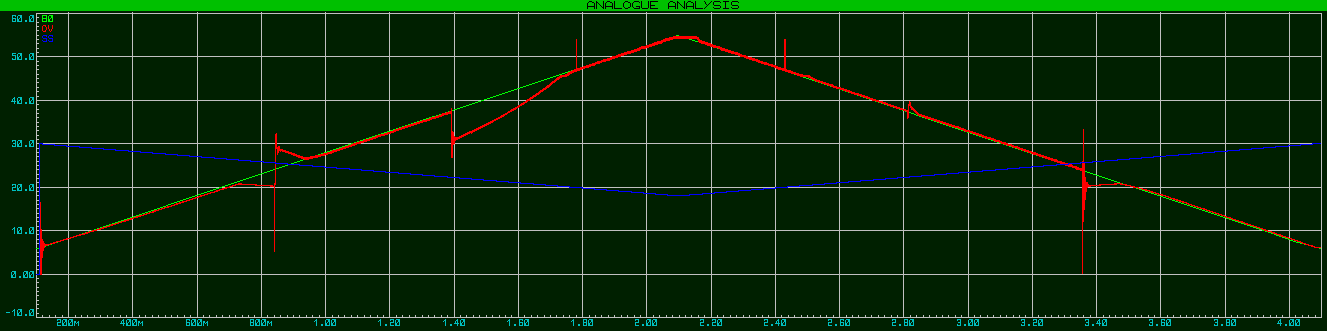
Onde uma variável recebe valores de saída da tabela verdade em pacotes menores e soma progressivamente até o ponto de ajuste.

**5.5.4 Simulação em Malha Fechada Proteus**

A simulação seguirá as mesmas condições anteriores, porém com a adição do controlador via código a partir da tabela verdade.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Source Signal (SS) em azul, Reference Signal (B0) em verde e Output Voltage (OV) em vermelho para comparação, resultante do sistema em malha fechada.

Figura X: Gráfico Resultante da Tensão de Saída do Sistema em Malha Fechada no Proteus

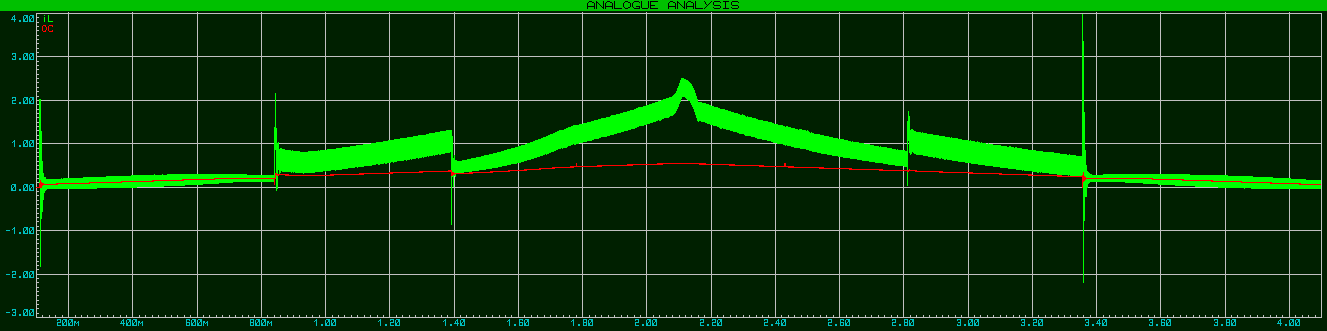


Fonte: Autor (Proteus)

É fácil identificar os pontos de transição do modo de operação, dada a ausência de histerese. Também se observa que a tensão de saída (representada em vermelho) seguiu a tensão de referência após a adição do compensador. Contudo, há regiões que demandam análise, nas quais a tensão divergiu inicialmente antes de atingir o valor desejado.

A Figura X ilustra a curva dos sinais Inductor Current (iL) em verde e Output Current (OC) em vermelho, resultante do sistema em malha fechada.

Figura X: Gráfico Resultante da Corrente de Saída do Sistema em Malha Fechada no Proteus



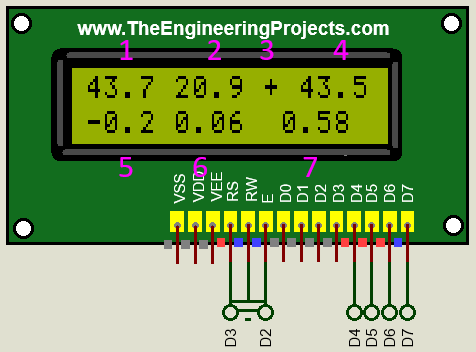
Fonte: Autor (Proteus)

A corrente do indutor manteve-se abaixo de 6 A, desconsiderando um ripple de 0.6 A. A corrente de saída, por sua vez, permaneceu inferior a 2 A. Como o sistema projetado possui múltiplos pontos de operação e apresenta não-linearidade, a faixa de corrente do sistema dependerá diretamente da carga aplicada.

**5.5.5 Simulação LCD Proteus**

Um display LCD foi integrado ao sistema, conectado ao microcontrolador, com o objetivo de visualizar em tempo real as informações e o estado de funcionamento. A Figura X ilustra a distribuição das informações no display.

Figura X: LCD para Visualização das Informações Implementada no Proteus



Fonte: Autor (Proteus)

Onde:

1. Tensão de Referência
2. Tensão de Entrada
3. Modo de Operação
4. Tensão de Saída
5. Erro
6. Ciclo de Trabalho Compensado
7. Ciclo de Trabalho Atual

Seu uso foi aplicado com mais ênfase na fase de testes, já que a simulação é pesada e as informações foram obtidas pelos gráficos analógicos.

**5.6 Bidirecionalidade Proteus**

Por questões de simplicidade, os testes e as aplicações foram realizados considerando-se uma direção única de operação no conversor. Para implementar a bidirecionalidade, é fundamental retomar a lógica de ativação dos switches apresentada na Tabela X. A fim de inverter a direção de operação do sistema, a lógica de ativação dos switches é alterada conforme a Tabela Y.

Tabela X: Lógica de Ativação dos Switches

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mode | AB | SW1 | SW2 | SW3 | SW4 |
| Buck | 00 | 1 | 0 | D | 1 - D |
| Buck-boost | 01 | 1 - D | D | D | 1 - D |
| Boost | 11 | 1 - D | D | 1 | D |
| Off | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Conforme a Tabela X, tem-se que:

* SW1 alterna entre 1 e 1 - D;
* SW2 alterna entre 0 e D;
* SW3 alterna entre 1 e D;
* SW4 alterna entre 0 e 1 - D.

Com base no circuito de chaveamento da Figura X, implementado para selecionar as entradas conforme a lógica controlada pelo microcontrolador, a única alteração necessária para a bidirecionalidade reside no tipo de PWM empregado. Por exemplo, se anteriormente o SW1 recebia um sinal lógico "1" e o PWM base (D), para a nova direção, será necessário que receba "1" e o PWM complementar (1 - D). Essa inversão é facilmente realizada no microcontrolador, invertendo os tipos de PWM transmitidos. Um trecho do código do PWM é alterado conforme apresentado a seguir.

|  |
| --- |
| if(invert != 0){  TCCR1A &= ~((1 << COM1A1) | (1 << COM1A0) | (1 << COM1B1) | (1 << COM1B0));  // Inverted mode: D9 = 1 - D, D10 = D  TCCR1A |= (1 << COM1A1) | (1 << COM1A0) | (1 << COM1B1);  }  else{  // Standart mode: D9 = D, D10 = 1 - D  TCCR1A |= (1 << COM1A1) | (1 << COM1B1) | (1 << COM1B0);  } |

Uma condição de inversão foi adicionada, podendo ser acionada por uma chave deslizante antes da etapa de conversão. Isso permite a alternância dos pinos do PWM e a implementação da bidirecionalidade via software.

Contudo, ainda é necessário realizar a troca da lógica de ativação dos relays. Conforme observado na Tabela X, a posição da entrada dos valores lógicos 0 e 1 é alterada, exigindo que os relays também recebam uma condição que verifique a direção de funcionamento. A seguir, é apresentado um trecho de código modificado.

|  |
| --- |
| // Buck Mode  if(hold > 1.25){  if(!(a == 0 && b == 0))fis\_duty = 0;  a = 0, b = 0; // Logic inputs  duty = ref/source + fis\_duty; // Duty calculation  // Operation side  if(invert != 0){  PORTB |= (1<<PB4) | (1<<PB5); // SW3 and SW4 relay control  PORTD &= ~(1<<PD0) & ~(1<<PD1); // SW1 and SW2 relay control  }  else{  PORTB &= ~(1<<PB4) & ~(1<<PB5); // SW3 and SW4 relay control  PORTD |= (1<<PD0) | (1<<PD1); // SW1 and SW2 relay control  }  } |

Com isso, tanto o PWM quanto a ativação dos relays estão configurados para o funcionamento da bidirecionalidade, necessitando apenas de uma simples modificação no código. O desenvolvimento inicial do sistema priorizou a operação em uma única direção devido à simplicidade e espelho de resultados, além dificuldades inerentes à simulação de um sistema bidirecional.