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) |

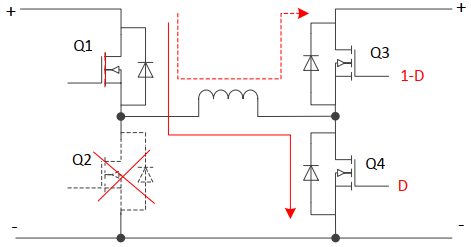
Onde:

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) |

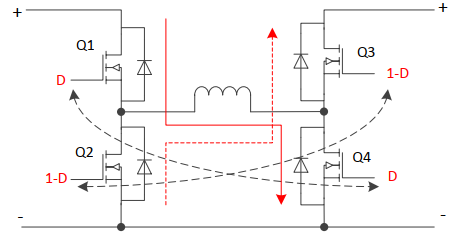
Onde:

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) |

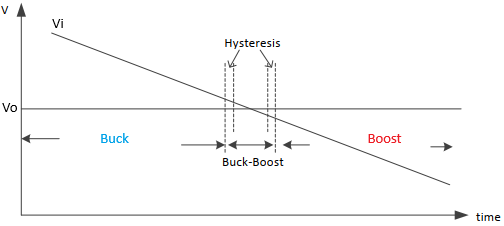
Onde:

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.

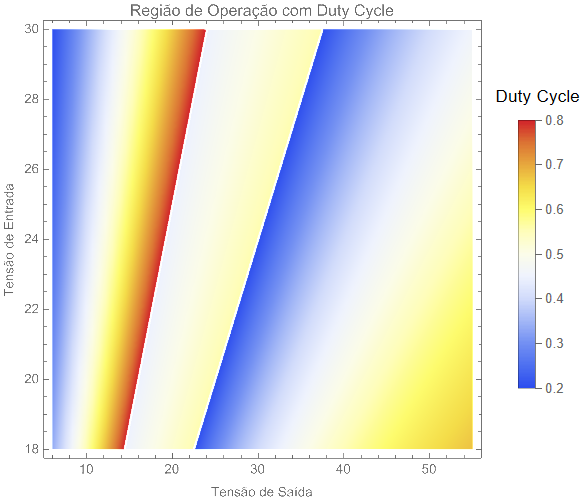
Tabela X: Resumo da Região de Operação/Tensão de Operação por Modo de Operação

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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.

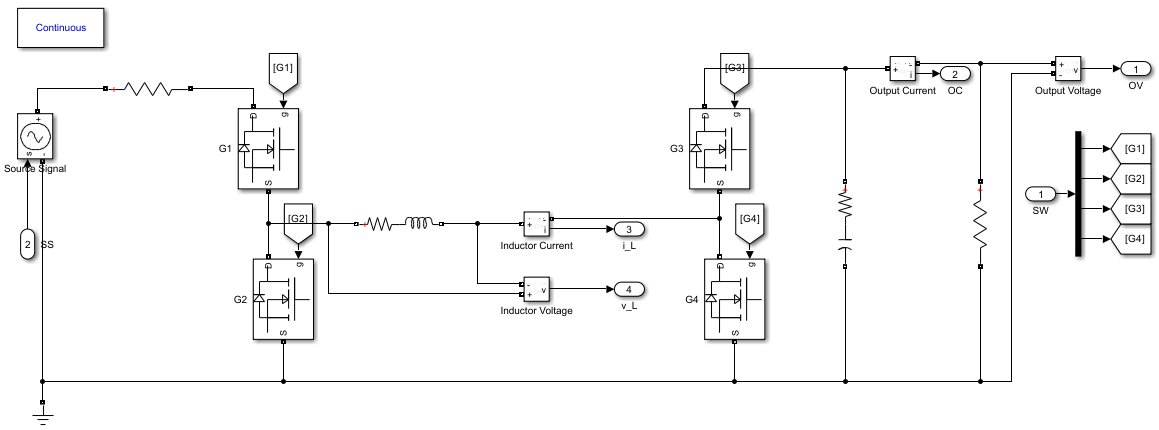
Tabela X: Gráfico do Duty Cycle por Região de Operação

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 |

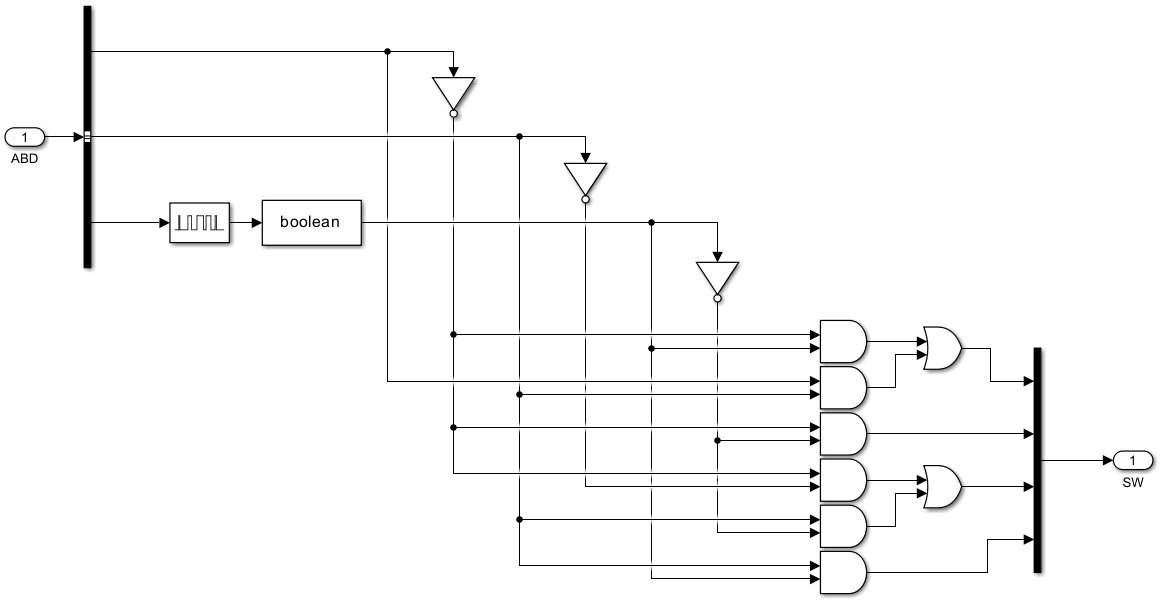
Com base nos princípios de sistemas digitais, é possível simplificar a lógica de acionamento de cada chave, resultando nas equações apresentadas a seguir.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (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

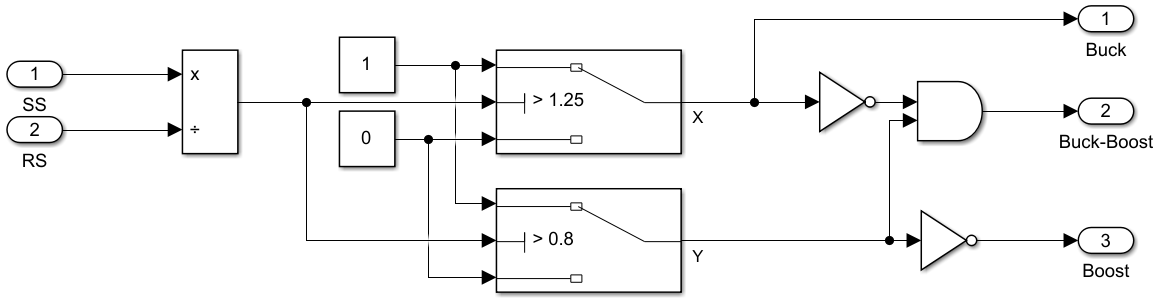
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| XY | Buck | Buck-Boost | Boost |
| 00 | 0 | 0 | 1 |
| 01 | 0 | 1 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | X | X | X |

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.

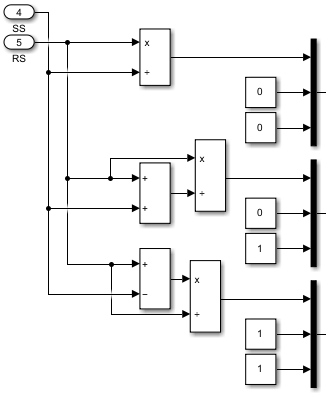
Figura X: Subsistema de Escolha de Modos Implementada



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

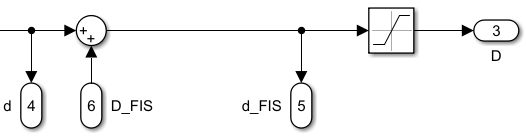
A black and white diagram

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.

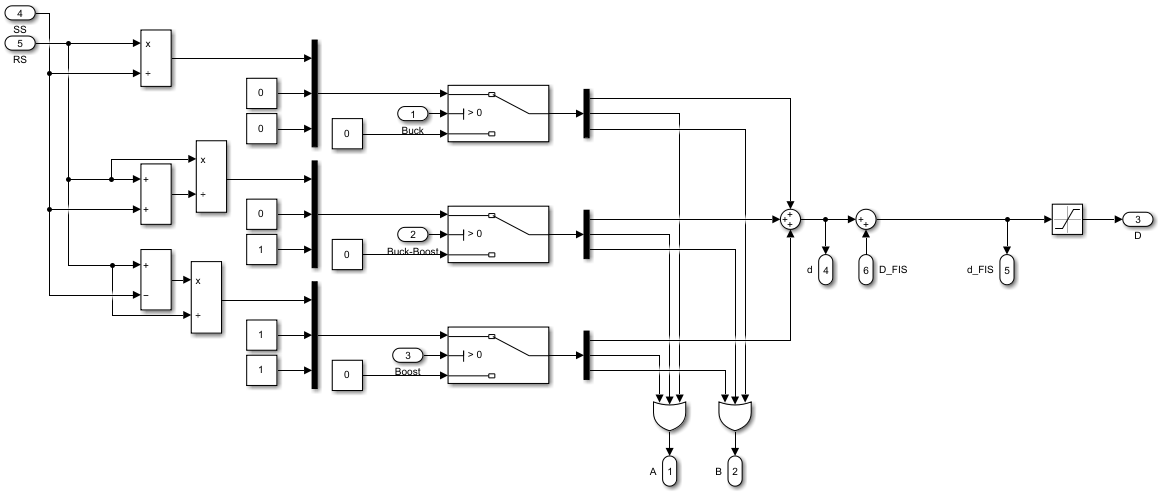
Figura X: Valor Final de D Implementada



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.

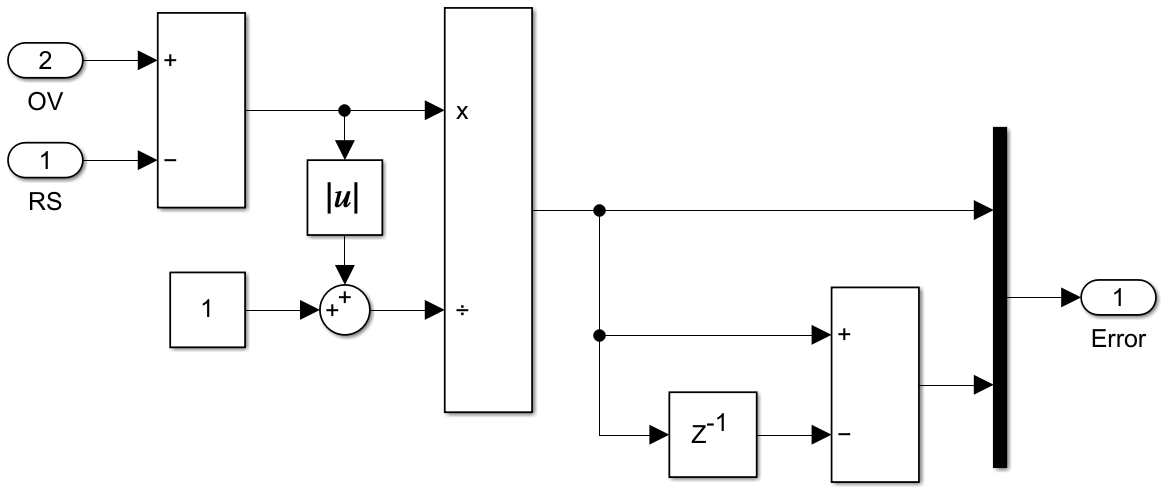
Para a visualização do erro e de sua variação, é necessário um subsistema. O erro pode ser caracterizado pela diferença entre a Tensão de Saída e a Tensão de Referência, e sua variação, pela diferença entre o erro atual e o anterior, considerando o uso de valores discretos. Para otimizar a visualização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

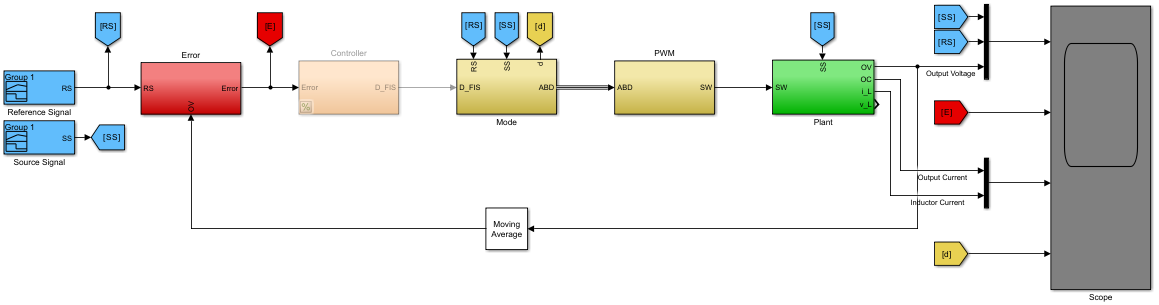
Figura X: Subsistema do Erro Normalizado Implementado



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.

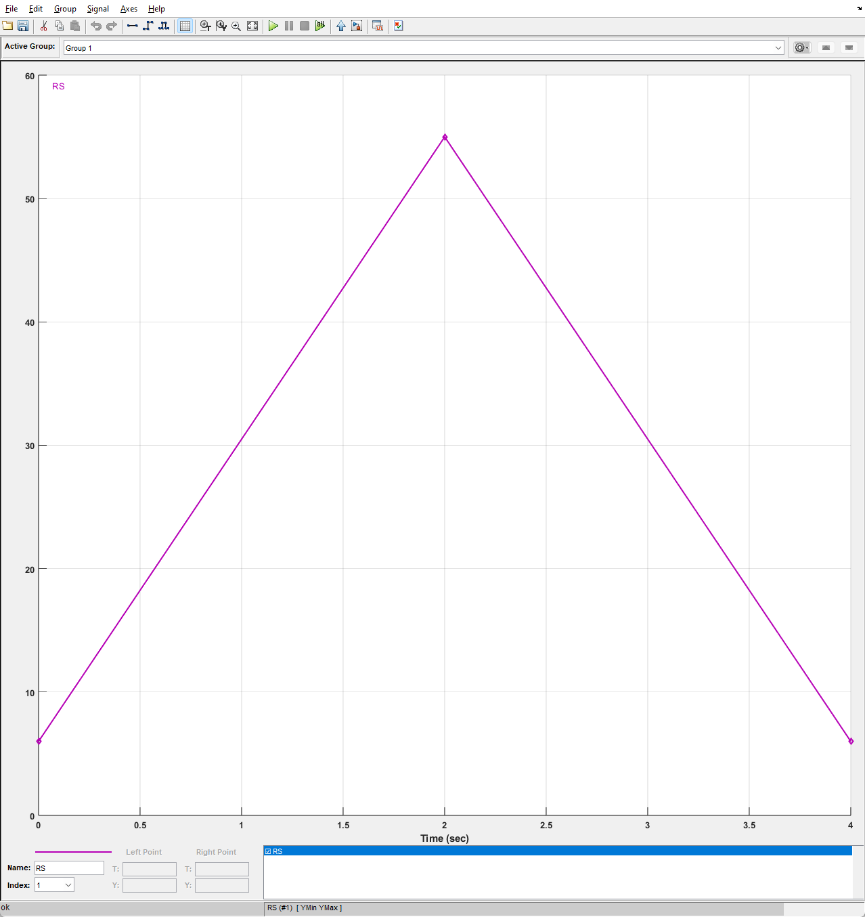
Fonte: Autor (Simulink)

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

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

Onde:

Figura X: Gráfico da Tensão de Referência (RS)



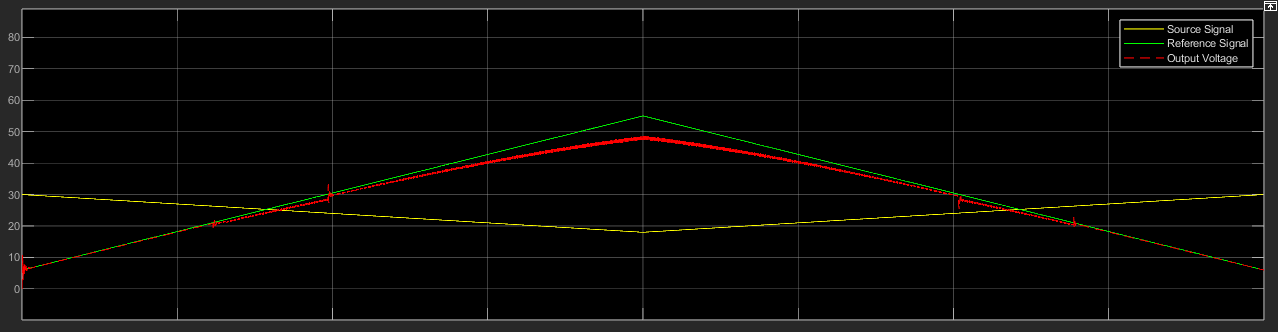
Fonte: Autor (Simulink)

**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

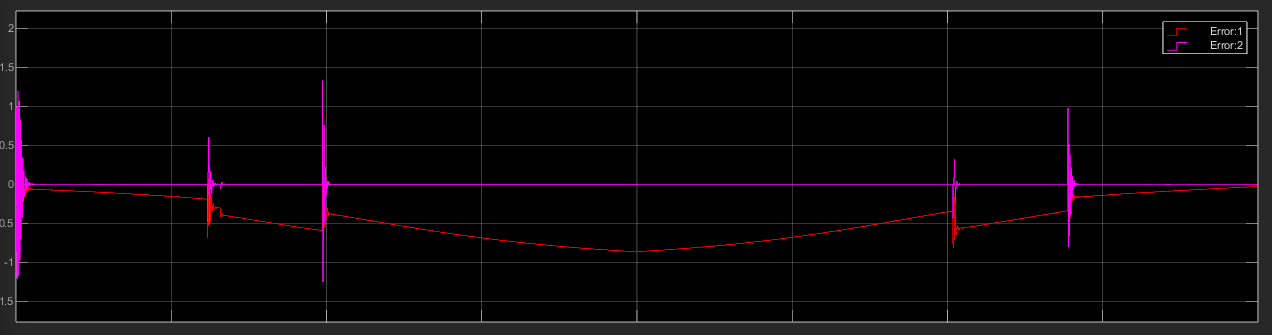


Fonte: Autor (Simulink)

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

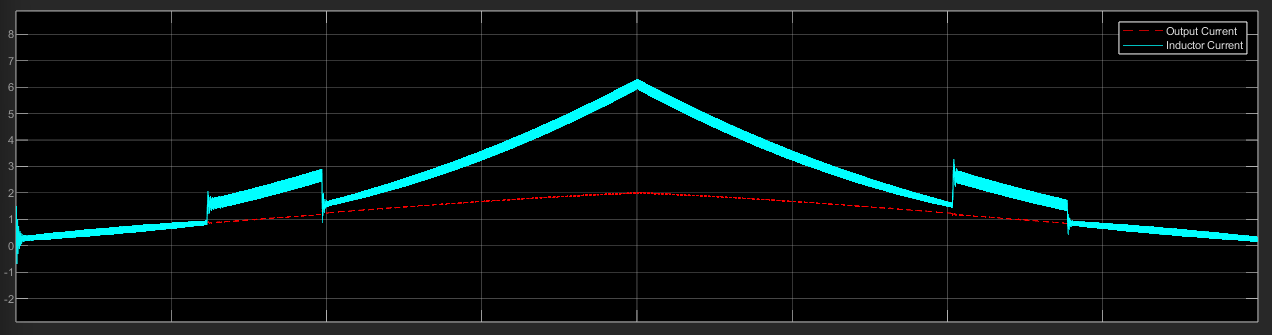


Fonte: Autor (Simulink)

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

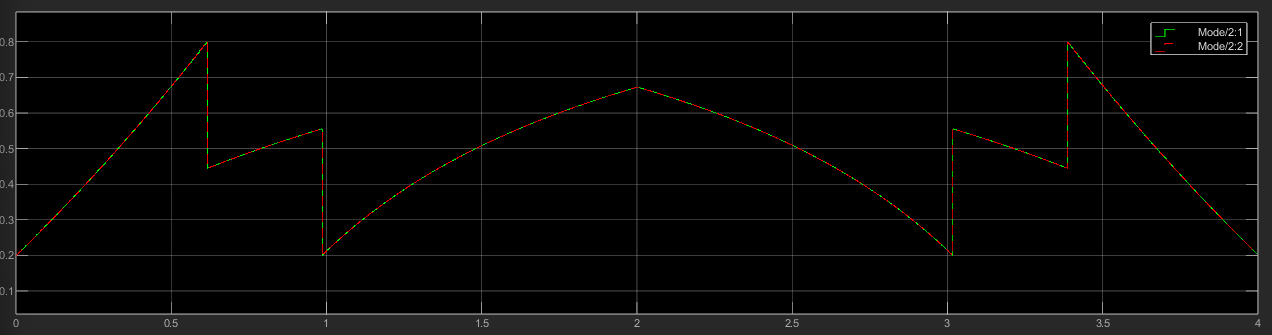


Fonte: Autor (Simulink)

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.

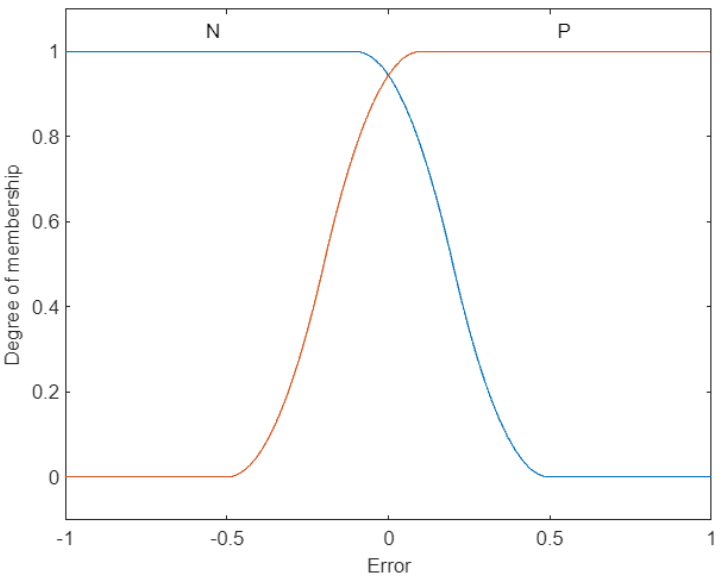
**5.5.2 Controle**

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

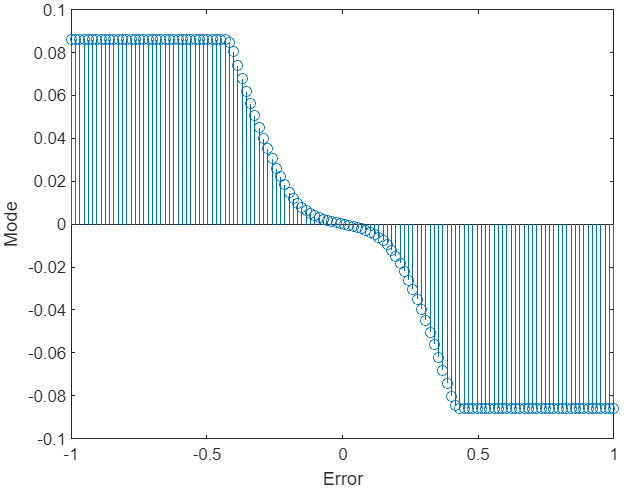
AI-generated content may be incorrect.

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.

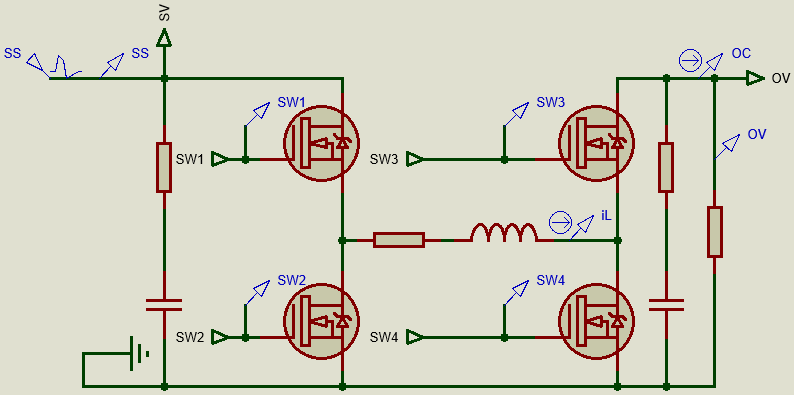
**5.6 Implementação Proteus (ATmega328P)**

Agora que foi realizado a implementação teórica, para a validação e verificação do 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.

Será utilizada a ferramenta Proteus para a concepção e simulação do circuito eletrônico, enquanto a plataforma Arduino, centrada no microcontrolador ATmega328P, será empregada para o desenvolvimento e teste do firmware.

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

Figura X: Conversor Buck-Boost Proteus



Fonte: Autor (Proteus)

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