

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

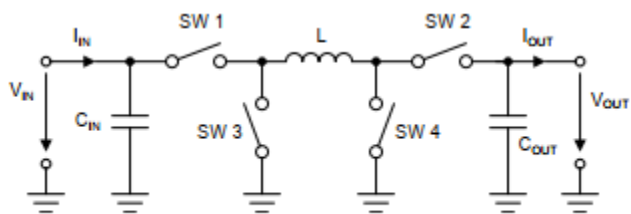
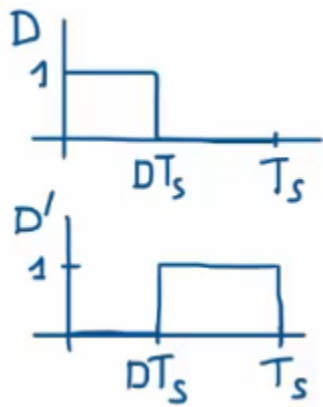


Figure 1. Buck-Boost Converter Schematic

## 2. Princípio de operação

$$\bar{D} = 1 - D$$



## 2.1 Buck síncrono

$$D = \frac{V_o}{V_i}$$

$$V_i > V_o$$

Apenas duas chaves são comutadas;

Não é possível operar com  $V_i = V_o$  or  $D = 1$ ;

Q3 é totalmente ligado e Q4 é totalmente desligado. Q1 e Q2 são controlados por D e 1 - D, respectivamente, e o conversor se torna um conversor buck sincronizado, conforme mostrado na Figura 4.

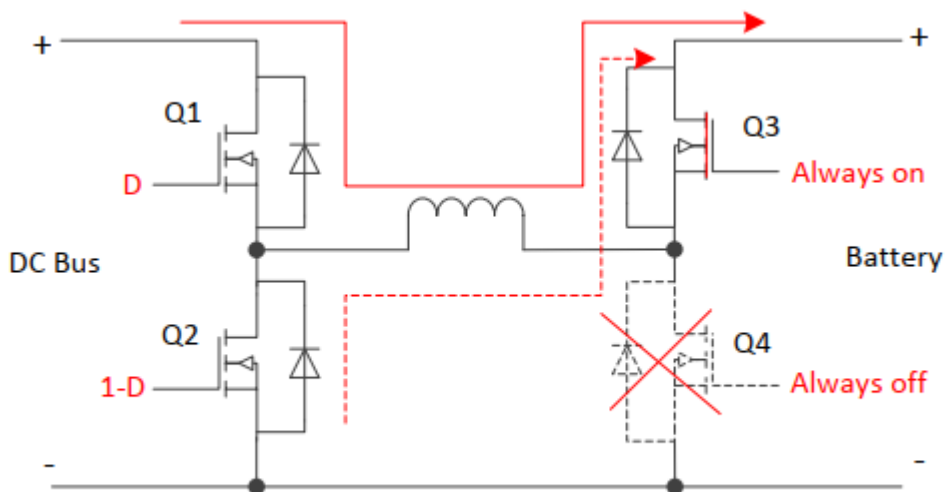


Figure 4. Synchronize Buck in Charge Mode

## 2.2 Boost síncrono

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$$

Apenas duas chaves são comutadas;

Não é possível operar com  $V_i = V_o$  or  $D = 0$ .

Q1 é totalmente ligado e Q2 é totalmente desligado. Q4 e Q3 são controlados por D e 1 - D, respectivamente, e o conversor se torna um conversor boost sincronizado, conforme mostrado na Figura 5.

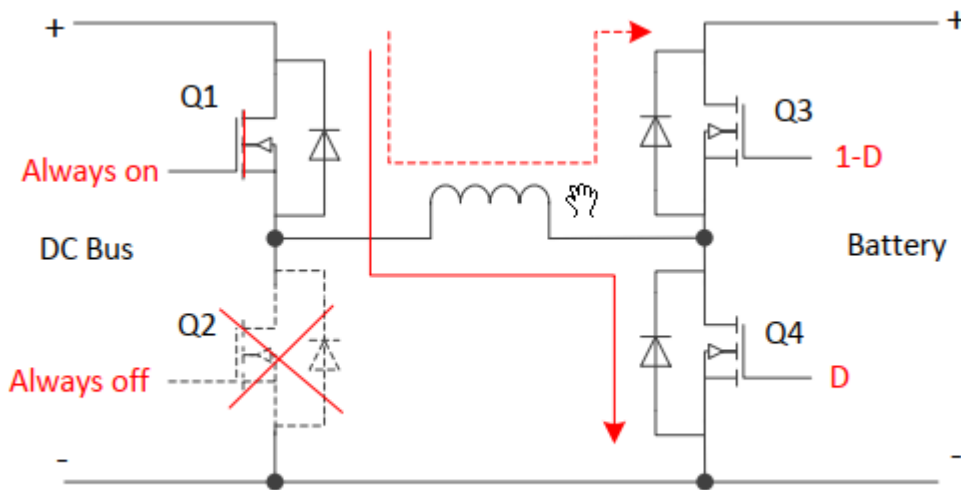


Figure 5. Synchronize Boost in Charge Mode

### 2.3 Buck-Boost síncrono

$$D = \frac{V_o}{V_i + V_o}$$

$$V_i \approx V_o$$

Four switches commutate;

Não é possível operar com  $V_i = V_o$  or  $D = 0.5$ ;

Maiores perdas de comutação;

Menor eficiência;

Q1 e Q4 são controlados por D, Q2 e Q3 são controlados por 1-D. O conversor se torna um conversor buck-boost sincronizado, conforme mostrado na Figura 6.

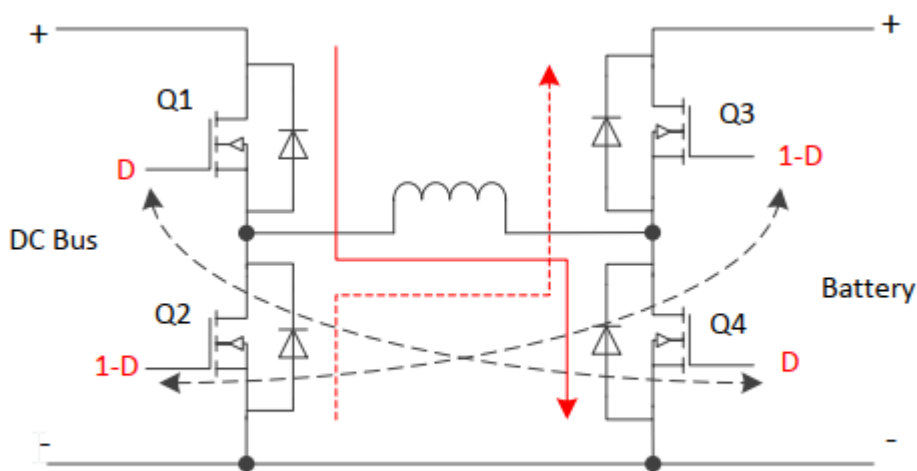


Figure 6. Synchronize Buck-Boost in Charge Mode

### 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 10. Para evitar um salto entre as operações, uma histerese é adicionada entre a transição do modo buck e buck-boost e entre o modo buck-boost e boost.

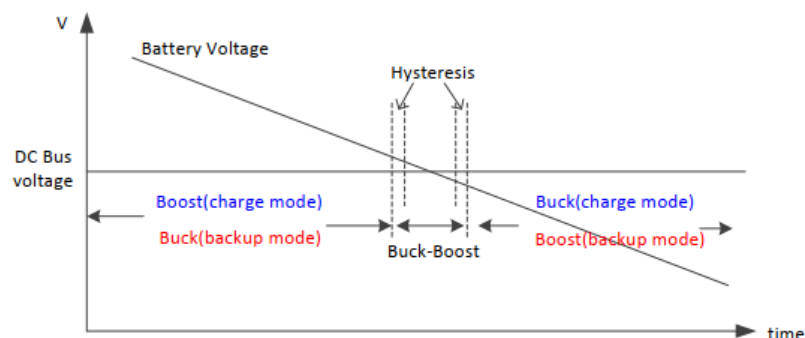
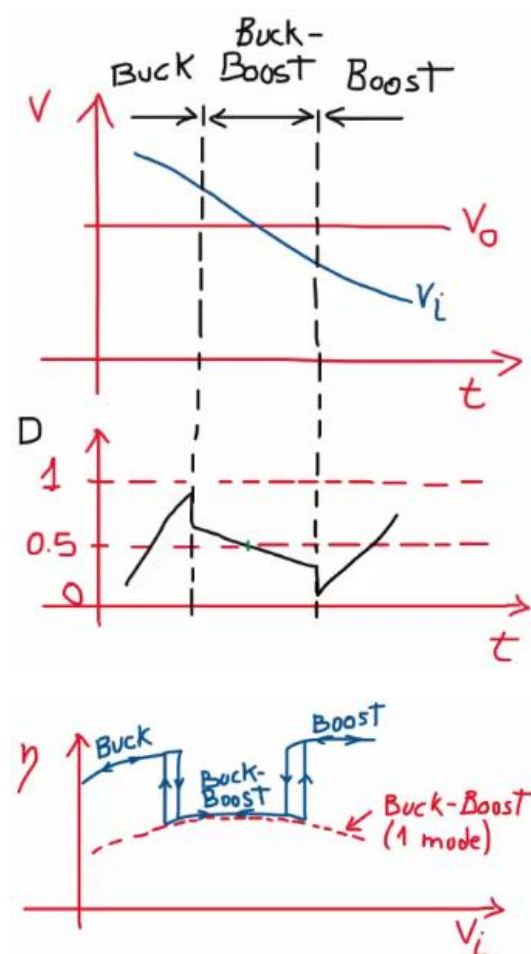


Figure 10. Operation modes vs. DC Bus and battery voltage



Um compensador deve ser projetado para operação estável;

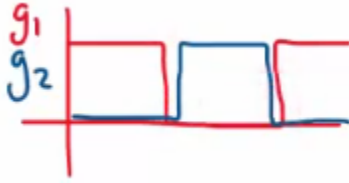
Há perturbações transitórias durante mudanças de modo.

## 4. Implementação

MOSFETs usados como interruptores;

Os switches superiores (S1, S3) precisam ser acionados;

O tempo de inatividade deve ser adicionado para evitar a corrente de disparo;



Um Bootstrap não pode ser usado: ele não consegue manter os interruptores do lado alto continuamente ligados;

Soluções típicas: gate drivers baseados em transformador e gate drivers baseados em optoacoplador.

### 4.1 Buck

$$D = \frac{V_o}{V_i}$$

$$L = \frac{1}{f \Delta i_L} * \left( V_o - \frac{V_o^2}{V_i} \right)$$

$$C = \frac{\Delta i_L}{8f \Delta V_o}$$

### 4.2 Buck-Boost

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_i}$$

$$L = \frac{1}{f \Delta i_L} * \frac{V_o}{1 + \frac{V_o}{V_i}}$$

$$C = \frac{I_o}{f \Delta V_o} * \frac{V_o}{V_o + V_i}$$

### 4.3 Boost

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o}$$

$$L = \frac{1}{f \Delta i_L} * \left( V_i - \frac{V_i^2}{V_o} \right)$$

$$C = \frac{I_o}{f \Delta V_o} * \frac{V_o - V_i}{V_o}$$

## 5. Design example

Faixa de tensão de entrada:  $V_i = [18,30] \text{ V}$

Faixa de ciclo de trabalho:  $D = [0.2,0.8]$

Modo de operação	Ciclo de trabalho
Buck	$D = \frac{1}{\frac{V_i}{V_o}}$
Buck-boost	$D = \frac{1}{1 + \frac{V_i}{V_o}}$
Boost	$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$

### 5.1 Região Buck

Primeiro calculamos os valores mínimos e máximos da tensão de saída possíveis nessa região com base no ciclo de trabalho determinado.

$$0.2 = \frac{1}{\frac{30}{V_{o_{min}}}} \rightarrow V_{o_{min}} = 6 \text{ V}$$

$$0.8 = \frac{1}{\frac{30}{V_{o_{max}}}} \rightarrow V_{o_{max}} = 24 \text{ V}$$

Agora calculamos uma relação entrada e saída que limitam essa região.

$$\frac{30}{24} < \frac{V_i}{V_o} \leq \frac{30}{6}$$

$$1.25 < \frac{V_i}{V_o} \leq 5$$

Com o limite esquerdo, calculamos as tensões de saída máximas com base na tensão de entrada que determinam a fronteira com a região Buck-Boost.

$$1.25 = \frac{18}{V_{o_1}} \rightarrow V_{o_1} = 14.4 \text{ V}$$

$$1.25 = \frac{30}{V_{o_2}} \rightarrow V_{o_2} = 24 \text{ V}$$

## 5.2 Região Boost

Primeiro calculamos os valores mínimos e máximos da tensão de saída possíveis nessa região com base no ciclo de trabalho determinado.

$$0.2 = 1 - \frac{18}{V_{o_{min}}} \rightarrow V_{o_{min}} = 22.5 \text{ V}$$

$$0.8 = 1 - \frac{30}{V_{o_{max}}} \rightarrow V_{o_{max}} = 150 \text{ V}$$

Agora calculamos uma relação entrada e saída que limitam essa região.

$$\frac{30}{150} \leq \frac{V_i}{V_o} < \frac{18}{22.5}$$

$$0.2 \leq \frac{V_i}{V_o} < 0.8$$

Com o limite direito, calculamos as tensões de saída mínimas com base na tensão de entrada que determinam a fronteira com a região Buck-Boost.

$$\frac{18}{V_{o_1}} = 0.8 \rightarrow V_{o_1} = 22.5 \text{ V}$$

$$\frac{30}{V_{o_2}} = 0.8 \rightarrow V_{o_2} = 37.5 \text{ V}$$

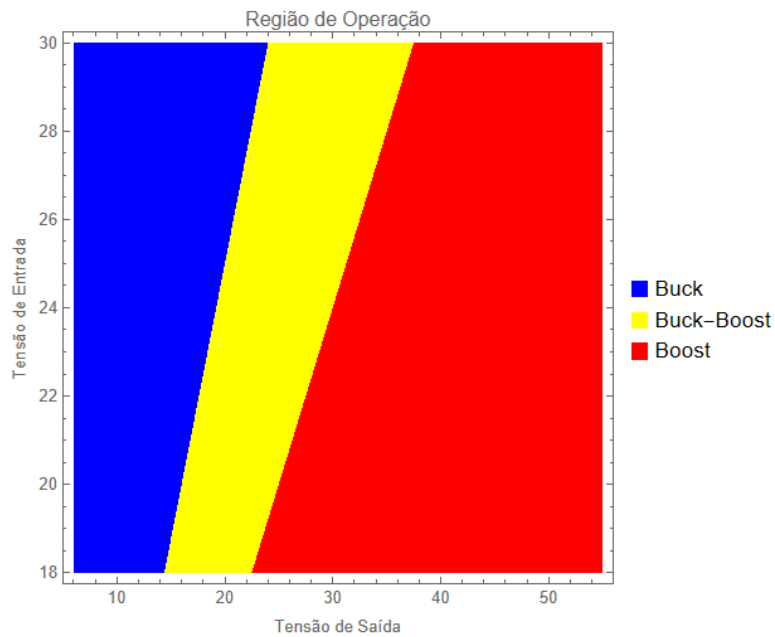
## 5.3 Regiões de operação

Faixa de tensão de saída:  $V_o = [6,55] \text{ V}$

Modo de operação	Ciclo de trabalho	Região de operação	Tensão de operação
<b>Buck</b>	$D = \frac{1}{\frac{V_i}{V_o}}$	$\frac{V_i}{V_o} > 1.25$	$V_i = [18,30]$ $V_o = [6,24]$
<b>Buck-Boost</b>	$D = \frac{1}{1 + \frac{V_i}{V_o}}$	$0.80 \leq \frac{V_i}{V_o} \leq 1.25$	$V_i = [18,30]$ $V_o = [14.4,37.5]$
<b>Boost</b>	$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$	$\frac{V_i}{V_o} < 0.80$	$V_i = [18,30]$ $V_o = [22.5,55]$



### 5.3.1 Regiões de operação



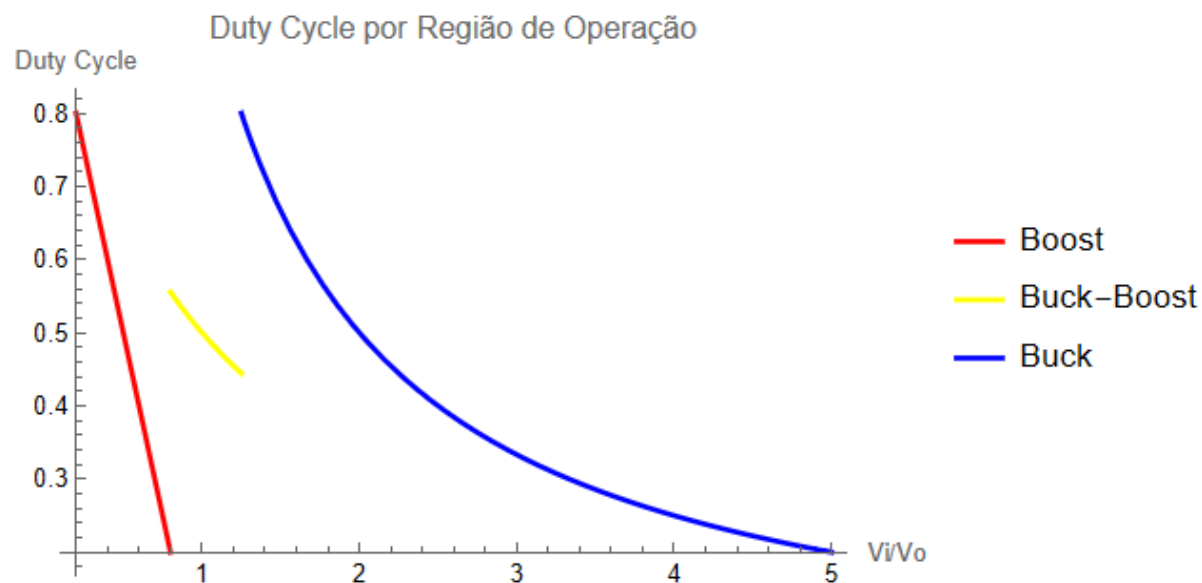
```
RegionPlot[
{y/x>1.25,0.8<=y/x<=1.25,y/x<0.8},
{x,6,55},
{y,18,30},
PlotStyle->{Blue, Yellow, Red},
BoundaryStyle->None,
FrameLabel->{"Tensão de Saída", "Tensão de Entrada"},
PlotLabel->"Região de Operação",
PlotLegends->{"Buck", "Buck-Boost", "Boost"}]
```

Com as regiões limitadas, podemos determinar o valor mínimo e máximo da região de operação, conforme a seguir.

$$0.2 \leq \frac{V_i}{V_o} < 0.8 \cap 1.25 < \frac{V_i}{V_o} \leq 5$$

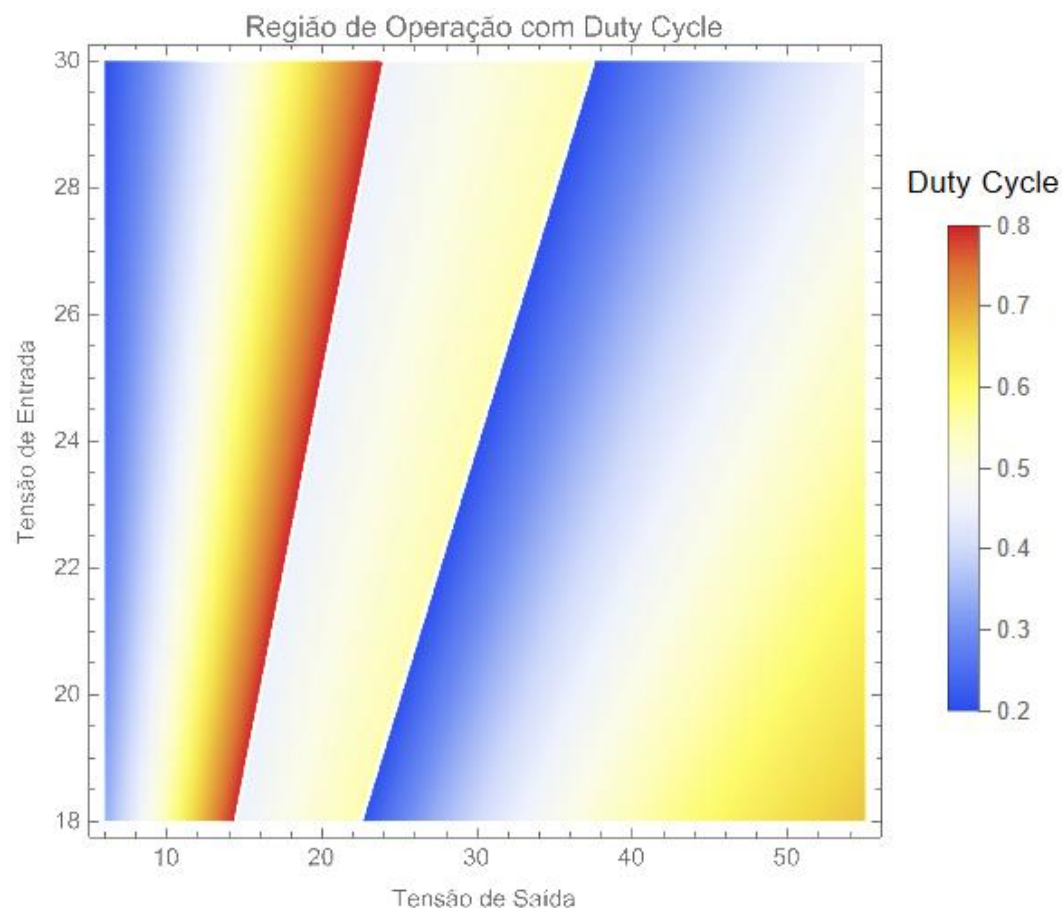
$$0.2 \leq \frac{V_i}{V_o} \leq 5$$

Sabendo como calcular os valores do ciclo de trabalho para cada região, podemos criar o gráfico que relaciona o ciclo de trabalho com a região de operação, conforme a seguir.



```
Plot[{
  Piecewise[{{1-x,x<0.8},{Indeterminate,True}}],
  Piecewise[{{1/(1+x),0.8<=x<=1.25},{Indeterminate,True}}],
  Piecewise[{{1/x,x>1.25},{Indeterminate,True}}]},
{x,0.2,5},
PlotStyle->{Red,Yellow,Blue},
AxesLabel->{"Vi/Vo","Duty Cycle"},
PlotLabel->"Duty Cycle por Região de Operação",
PlotLegends->{"Boost","Buck-Boost","Buck"}]
```

Também podemos calcular o ciclo de trabalho para cada região do gráfico “Região de Operação” e criar um gráfico de temperatura, conforme a seguir.



```

DensityPlot[
Piecewise[{
{x/y,y/x>1.25},
{x/(x+y),0.8<=y/x<=1.25},
{(x-y)/x,y/x<0.8}}],
{x,6,55},
{y,18,30},
ColorFunction->"TemperatureMap",
PlotLegends->BarLegend[{"TemperatureMap",{0.2,0.80}},
LegendLabel->"Duty Cycle",
Ticks->Range[0,1,0.1]],
FrameLabel->{"Tensão de Saída","Tensão de Entrada"},
PlotLabel->"Região de Operação com Duty Cycle",
RegionFunction->Function[{x,y},6<=x<=55&&18<=y<=30],
PlotPoints->64]

```

```

Plot3D[
Piecewise[{
{x/y,y/x>1.25},
{x/(x+y),0.80<=y/x<=1.25},
{(x-y)/x,y/x<0.8}}],
{x,6,55},{y,18,30},
AxesLabel->{"Tensão de Saída","Tensão de Entrada","Duty Cycle"},
ColorFunction->Function[{x,y,z},If[y/x>1.25,Blue,If[0.80<=y/x<=1.25,Yellow,Red]]],ColorFunctionScaling-
>False,BoxRatios->{1,1,1}]

```

## 5.4 Cálculo dos componentes

Output current:  $I_o = 2 \text{ A}$

Switching frequency:  $f = 10 \text{ kHz}$

Inductor current ripple:  $0.6 \text{ A}$  (30%)

Output voltage ripple:  $1 \text{ V}$  (2%)

Modo de operação	Tensão de operação
Buck	$V_i = [18,30]$ $V_o = [6,24]$
Buck-Boost	$V_i = [18,30]$ $V_o = [14.4,37.5]$
Boost	$V_i = [18,30]$ $V_o = [22.5,55]$

### 5.4.1 Buck

$$L_{max} = \frac{1}{f \Delta i_L} * \left( V_o - \frac{V_o^2}{V_{i_{max}}} \right) = \frac{1}{10 * 10^3 * 0.6} * \left( V_o - \frac{V_o^2}{30} \right)$$

$$\frac{d}{dV_o} L_{max} = 0 \rightarrow V_o = 15 \text{ V}$$

$$L_{max} = \frac{1}{10 * 10^3 * 0.6} * \left( 15 - \frac{15^2}{30} \right) = 1.25 \text{ mH}$$

```
Io=2;
f=10*10^3;
Lr=0.6;
Vr=1;
Lmax[Vi_,Vo_]:=1/(f*Lr)*(Vo-Vo^2/Vi);
NMaximize[{Lmax[Vi,V0],18<=Vi<=30,6<=Vo<=24},{Vi,V0}]
```

$$C = \frac{\Delta i_L}{8f \Delta V_o} = \frac{0.6}{8 * 10 * 10^3 * 1} = 7.5 \text{ uF}$$

### 5.2 Buck-Boost

$$L_{max} = \frac{1}{f \Delta i_L} * \frac{V_{o_{max}}}{1 + \frac{V_{o_{max}}}{V_{i_{max}}}} = \frac{1}{10 * 10^3 * 0.6} * \frac{37.5}{1 + \frac{37.5}{30}} = 2.78 \text{ mH}$$

$$C_{max} = \frac{I_o}{f \Delta V_o} * \frac{V_{o_{max}}}{V_{o_{max}} + V_{i_{min}}} = \frac{2}{10 * 10^3 * 1} * \frac{37.5}{37.5 + 18} = 135.1 \text{ uF}$$

### 5.3 Boost

$$L_{max} = \frac{1}{f\Delta i_L} * \left( V_i - \frac{V_i^2}{V_{o_{max}}} \right) = \frac{1}{10 * 10^3 * 0.6} * \left( V_i - \frac{V_i^2}{55} \right)$$

$$\frac{d}{dV_i} L_{max} = 0 \rightarrow V_i = 27.5 \text{ V}$$

$$L_{max} = \frac{1}{10 * 10^3 * 0.6} * \left( 27.5 - \frac{27.5^2}{55} \right) = 2.29 \text{ mH}$$

```
Io=2;  
f=10*10^3;  
Lr=0.6;  
Vr=1;  
Lmax[Vi_,Vo_]:=1/(f*Lr)*(Vi-Vi^2/Vo);  
NMaximize[{Lmax[Vi,V0],18<=Vi<=30,22.5<=Vo<=55},{Vi,V0}]
```

$$C_{max} = \frac{I_o}{f\Delta V_o} * \frac{V_{o_{max}} - V_{i_{min}}}{V_{o_{max}}} = \frac{2}{10 * 10^3 * 1} * \frac{55 - 18}{55} = 134.5 \text{ uF}$$

### 5.4 Verification

$$L = 2.78 \text{ mH}$$

$$C = 135.1 \text{ uF}$$

#### 5.4.1 Buck

$$2.78 * 10^{-3} = \frac{1}{10 * 10^3 * \Delta i_L} * \left( 15 - \frac{15^2}{30} \right) \rightarrow \Delta i_L = 0.27 \text{ A}$$

$$135.1 * 10^{-6} = \frac{0.27}{8 * 10 * 10^3 * \Delta V_o} \rightarrow \Delta V_o = 0.025 \text{ V}$$

#### 5.4.2 Buck-Boost

$$2.78 * 10^{-3} = \frac{1}{10 * 10^3 * \Delta i_L} * \frac{37.5}{1 + \frac{37.5}{30}} \rightarrow \Delta i_L = 0.6 \text{ A}$$

$$135.1 * 10^{-6} = \frac{2}{10 * 10^3 * \Delta V_o} * \frac{37.5}{37.5 + 18} \rightarrow \Delta V_o = 1 \text{ V}$$

#### 5.4.2 Boost

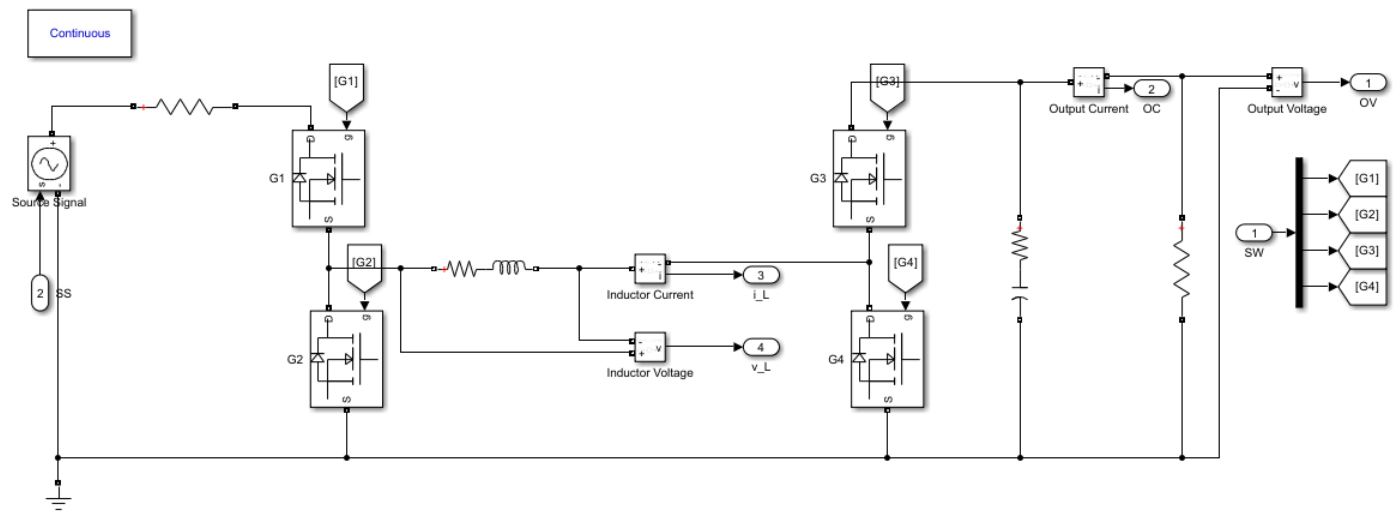
$$2.78 * 10^{-3} = \frac{1}{10 * 10^3 * \Delta i_L} * \left( 27.5 - \frac{27.5^2}{55} \right) \rightarrow \Delta i_L = 0.49 \text{ A}$$

$$135.1 * 10^{-6} = \frac{2}{10 * 10^3 * \Delta V_o} * \frac{55 - 18}{55} \rightarrow \Delta V_o = 1 \text{ V}$$

Modo de operação	Faixa de operação (V)	Duty Cycle	$V_i/V_o$	$\Delta i_{L_{max}}$ (A)	$\Delta V_{o_{max}}$ (V)
<b>Buck</b>	$V_i = [18,30]$ $V_o = [6,24]$	$D = [0.2,0.8]$	$0.2 \leq \frac{V_i}{V_o} < 0.8$	0.27	0.025
<b>Buck-Boost</b>	$V_i = [18,30]$ $V_o = [14.4,37.5]$	$D = [0.\bar{4}, 0.\bar{5}]$	$0.8 \leq \frac{V_i}{V_o} \leq 1.25$	0.6	1
<b>Boost</b>	$V_i = [18,30]$ $V_o = [22.5,55]$	$D = [0.2,0.8]$	$1.25 < \frac{V_i}{V_o} \leq 5$	0.49	1

## 5.5 Simulink implementation

O circuito base do conversor é implementado no Simulink em um subsistema conforme abaixo.



O subsistema possui 2 entradas, sendo elas: Source Signal (SS) e SW ( 4 Switches multiplexados). E 4 saídas, sendo elas: Output Voltage (OV), Output Current (OC), Inductor Voltage (v\_L) e Inductor Current (i\_L).

Os 4 modos de funcionamento dependem do estado dos 4 Switches e do seu Duty Cycle respectivo. Como temos 4 modos diferentes, precisamos de 2 bits para representar os modos. A tabela abaixo resume a lógica da ativação de cada Switch usando A e B como entradas lógicas.

Mode	AB	SW1	SW2	SW3	SW4
<b>Buck</b>	00	D	1 - D	1	0
<b>Buck-boost</b>	01	D	1 - D	1 - D	D
<b>Boost</b>	11	1	0	1 - D	D
<b>Off</b>	10	0	0	0	0

Usando conhecimentos de sistemas digitais, podemos simplificar a relação para cada Switch, chegando nas equações abaixo.

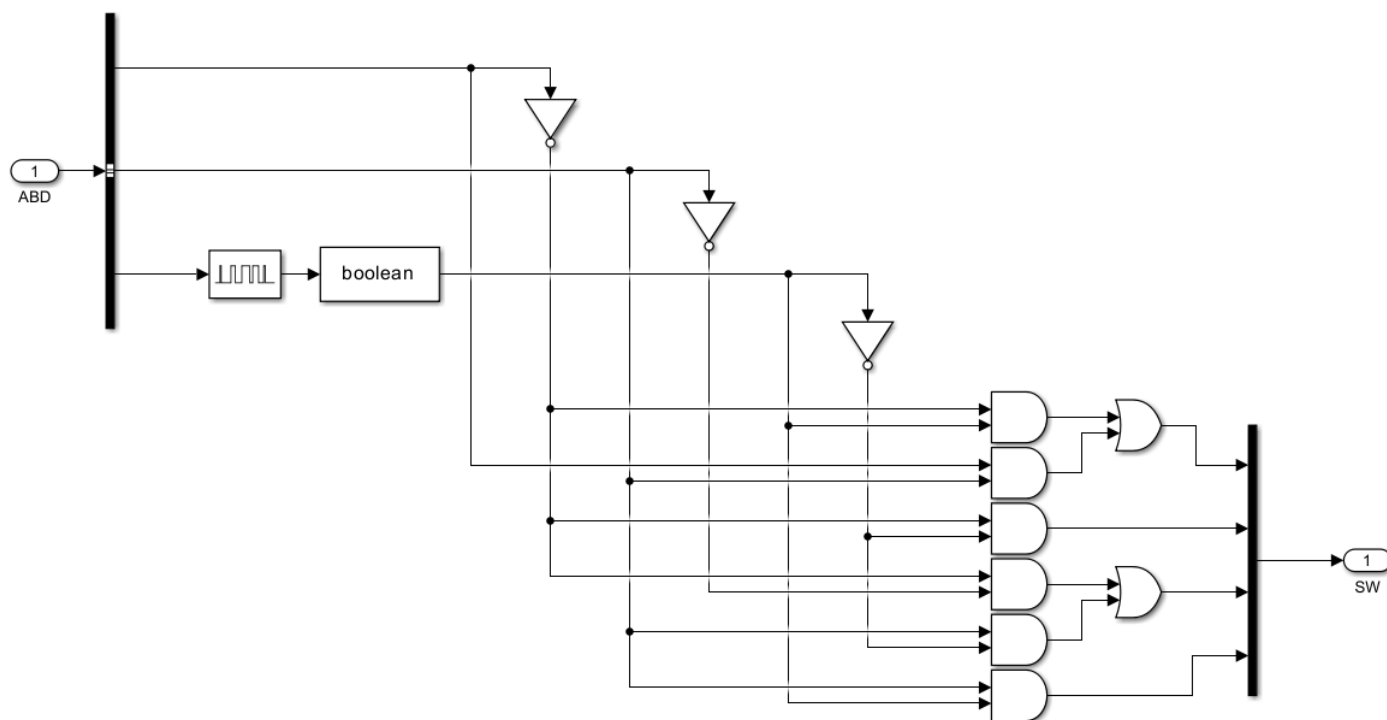
$$SW1 = \bar{A}D + AB$$

$$SW2 = \bar{A}\bar{D}$$

$$SW3 = \bar{A}\bar{B} + B\bar{D}$$

$$SW4 = BD$$

A partir das relações acima, podemos implementar no Simulink um subsistema para aplicar o funcionamento de cada Switch a partir das entradas A, B e D.



O modo de funcionamento atual e futuro do sistema é definido a partir da relação entre Tensão de Entrada e Tensão de Referência, conforme a tabela abaixo.

Modo de operação	$V_i/V_o$
<b>Buck</b>	$1.25 < \frac{V_i}{V_o} \leq 5$
<b>Buck-Boost</b>	$0.8 \leq \frac{V_i}{V_o} \leq 1.25$
<b>Boost</b>	$0.2 \leq \frac{V_i}{V_o} < 0.8$

A tabela indica que, enquanto a Tensão de Entrada estiver acima de 125% da Tensão de Referência, o modo de funcionamento será Buck. E, enquanto a Tensão de Entrada estiver abaixo de 80% da Tensão de Referência, o modo de funcionamento será Boost.

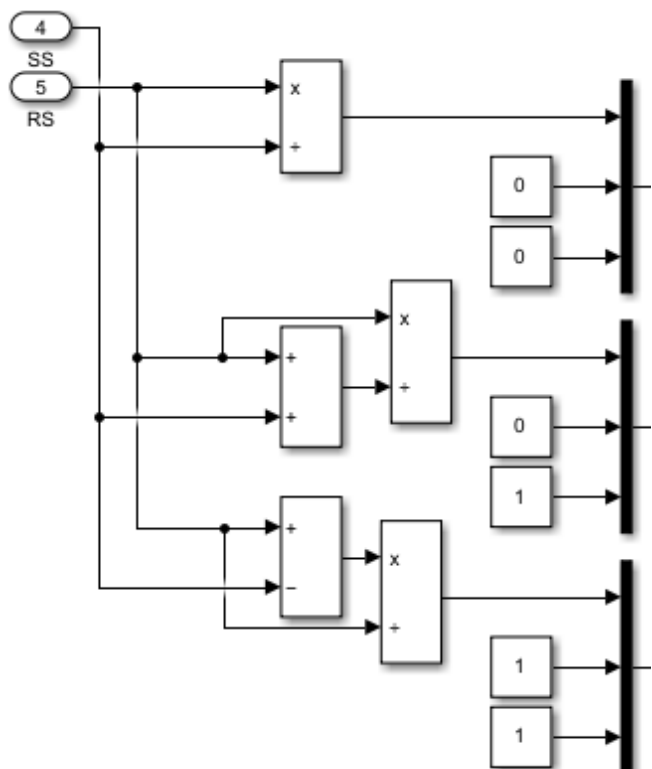
Podemos escrever essa relação conforme abaixo.

$$X = \frac{V_i}{V_o} > 1.25$$

$$Y = \frac{V_i}{V_o} > 0.8$$

A tabela abaixo resume a lógica do modo de funcionamento acima.

XY	Buck	Buck-Boost	Boost
<b>00</b>	0	0	1
<b>01</b>	0	1	0
<b>11</b>	1	0	0
<b>10</b>	X	X	X

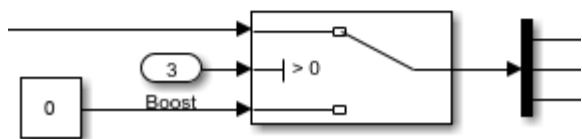
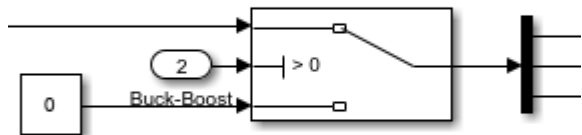
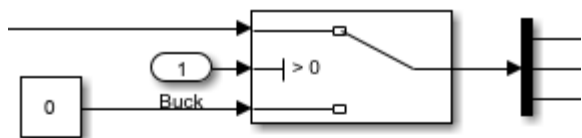




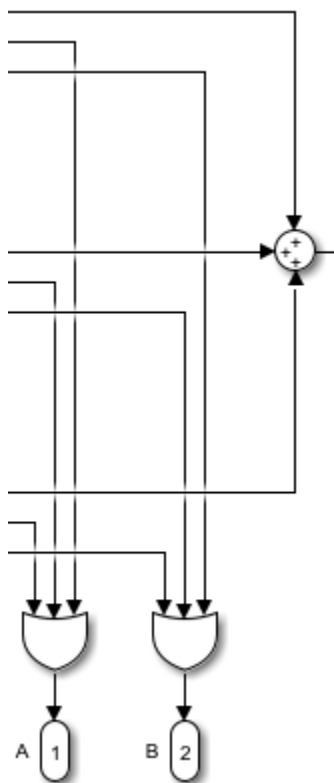
O valor de A e B, escolhido anteriormente conforme a tabela abaixo, também é anexado junto ao seu respectivo D pelo MUX.

Mode	AB
Buck	00
Buck-boost	01
Boost	11

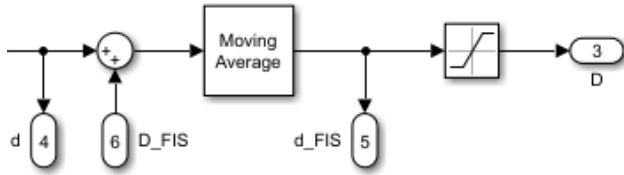
Para definir qual valor será utilizado, usamos o resultado do subsistema anterior juntamente com comparadores lógicos para levar o valor até as variáveis A, B e D pelo DEMUX, conforme abaixo.



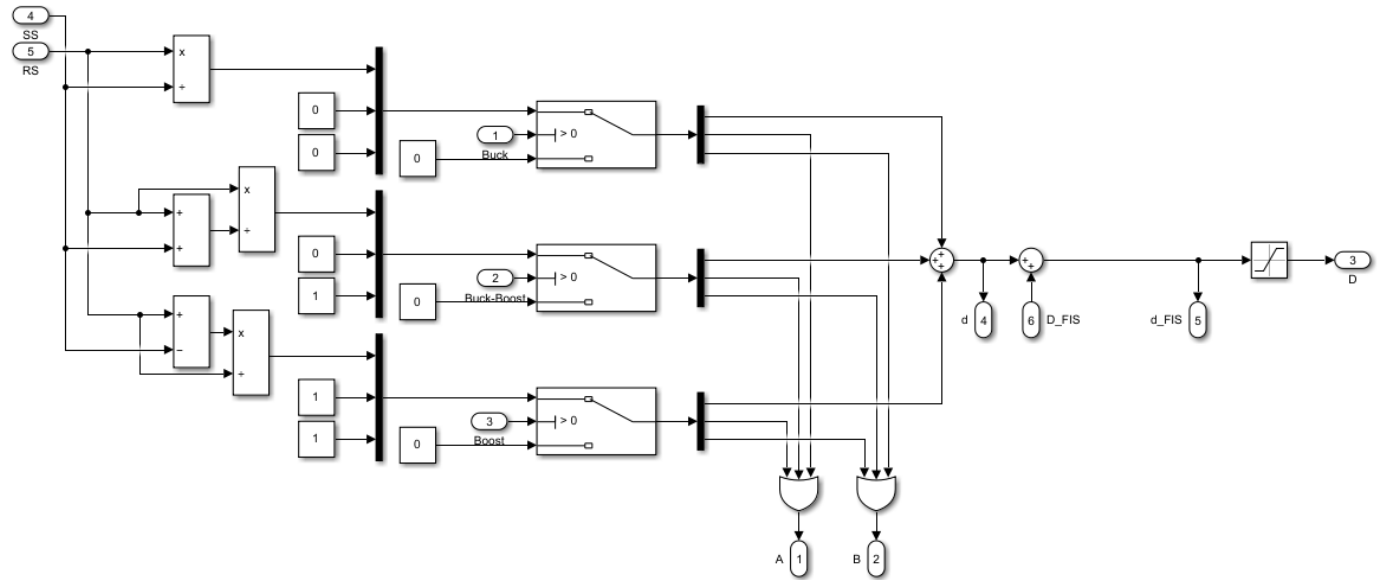
Como somente um dos comparadores estará ativo por vez, A e B pode ser calculado com uma porta OR enquanto D pode ser calculado como uma soma simples, conforme abaixo.



Por fim, para propósitos de controle, podemos somar a variável D com uma entrada externa (D\_FIS). Também, como definido anteriormente, o Duty Cycle é saturado entre 0.2 e 0.8.



Assim, obtemos nosso subsistema responsável por determinar a variável D do sistema.



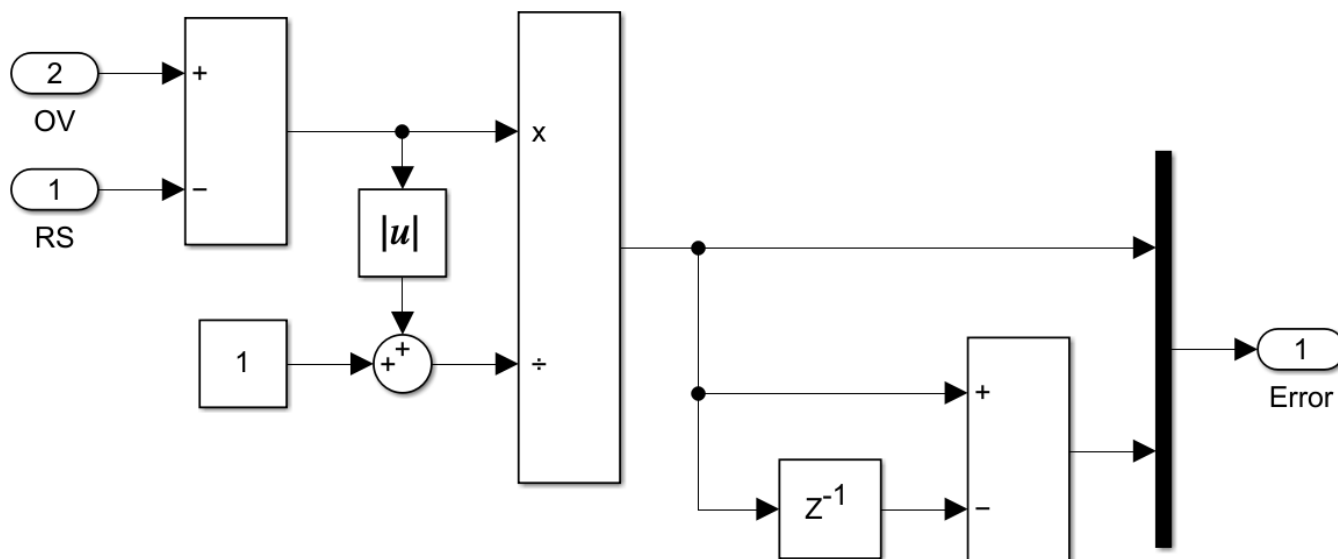
Com as variáveis A, B e D determinadas, o funcionamento dos Switches também estão determinados e, portanto, o sistema está pronto para funcionamento em malha aberta.

Para visualizar o erro e sua variação precisamos de um subsistema. O erro pode ser definido pelo quão distante está a Tensão de Saída da Tensão de Referência e a variação do erro pode ser definida pela diferença entre o erro atual e anterior, assumindo o uso de valores discretos. Para facilitar a visualização do desempenho, vamos empregar um erro normalizado, conforme abaixo.

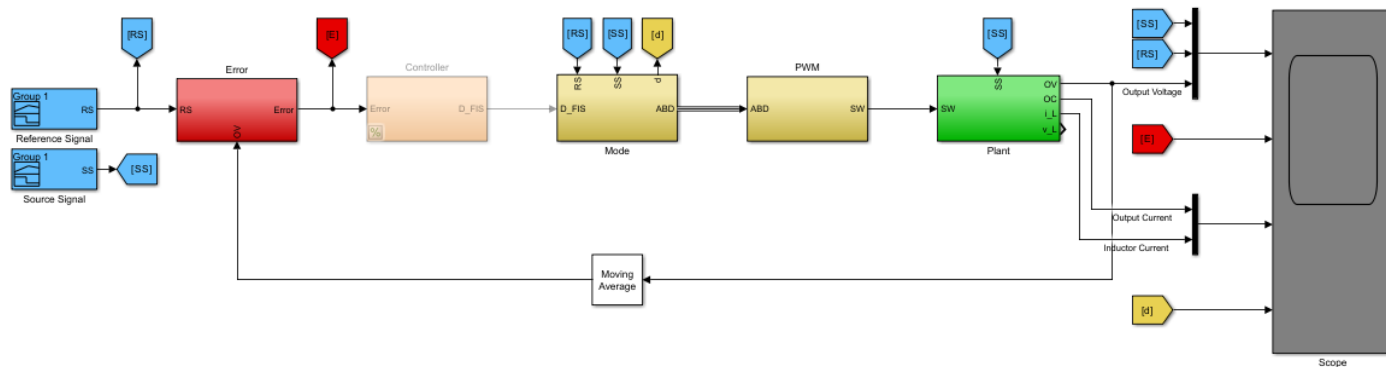
$$E[n] = \frac{V_o - V_r}{|V_o - V_r| + 1}$$

$$dE[n] = E[n] - E[n - 1]$$

O subsistema aplicado no Simulink pode ser visualizado abaixo.



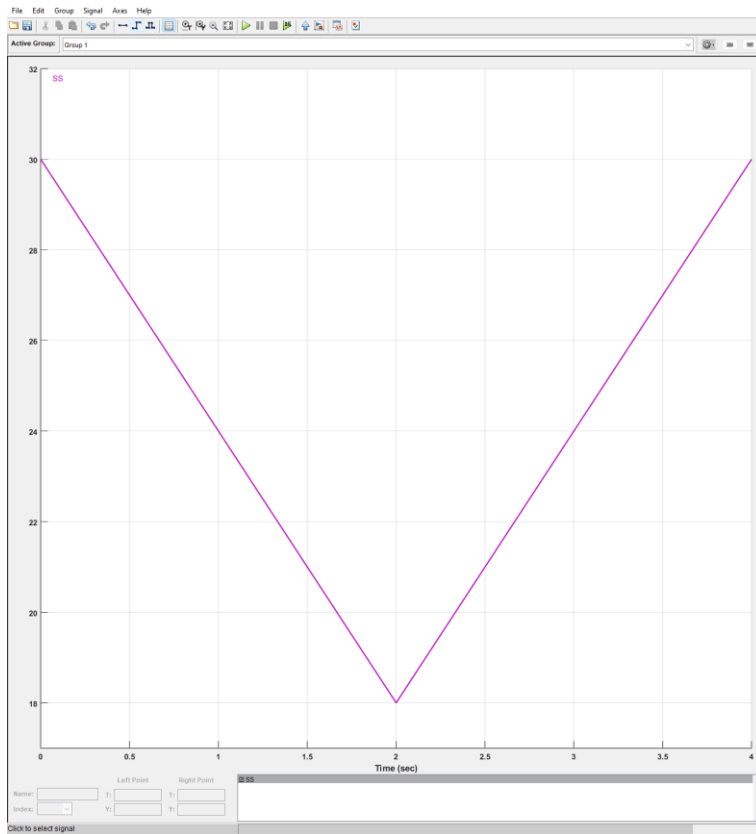
O resultado final do sistema em malha aberta e visualização do erro a partir da união dos subsistemas, pode ser visualizado abaixo.



Agora fazemos uma simulação que pegue todos as possíveis combinações de tensão de entrada e saída a seguir.

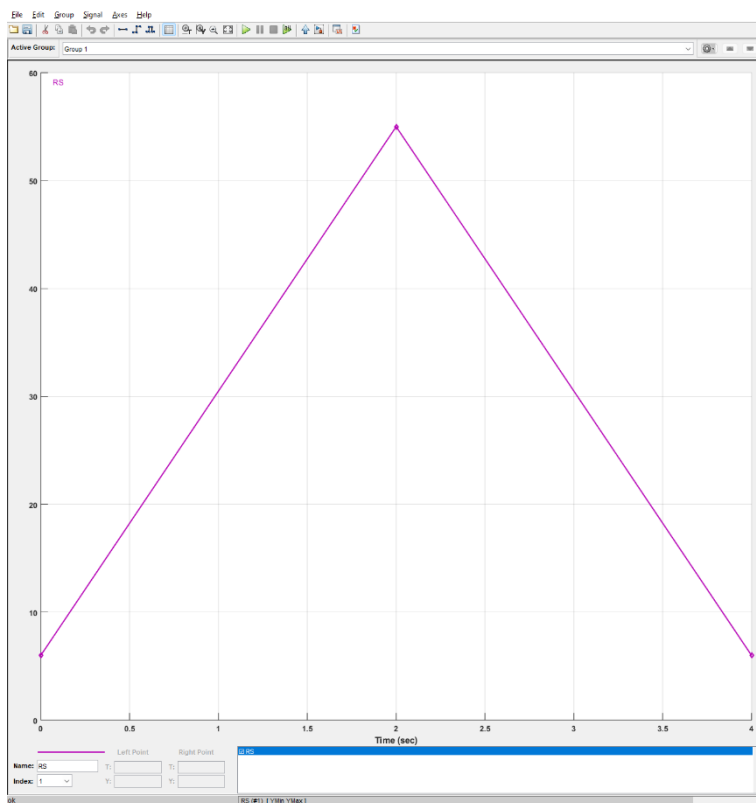
A tensão de entrada (SS) consistirá em duas rampas definidas pela função abaixo.

$$SS(t) = |12 - 6t| + 18$$

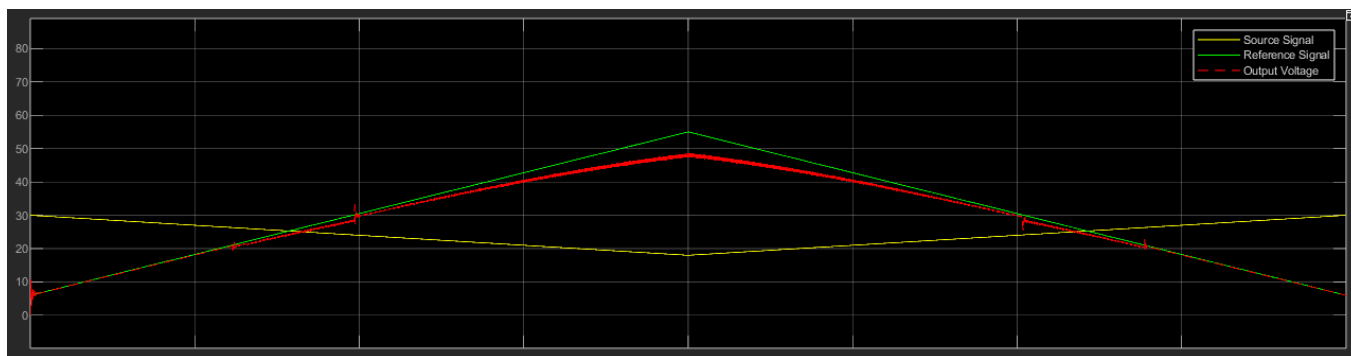


O sinal de referência (RS) consistirá em duas rampas definidas pela função abaixo.

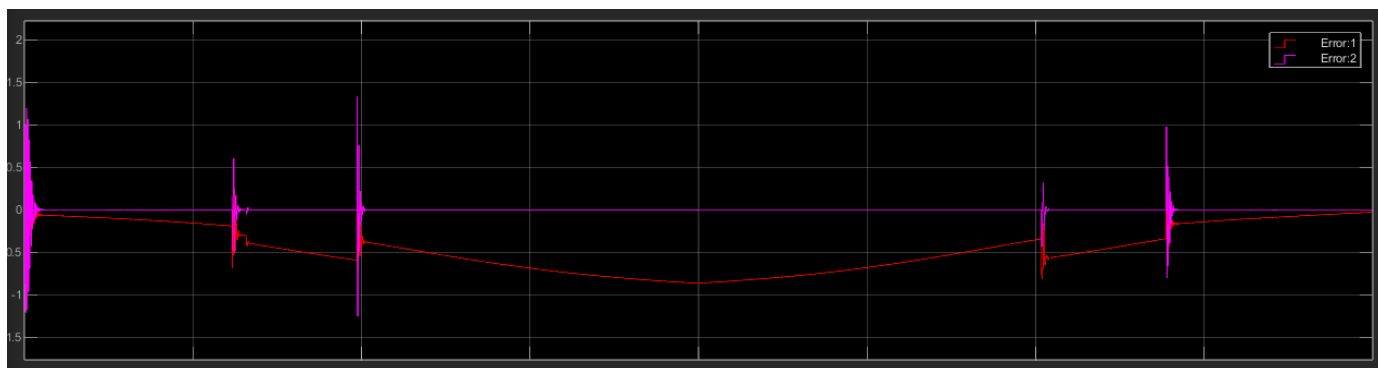
$$RS(t) = 55 - |49 - 24.5t|$$



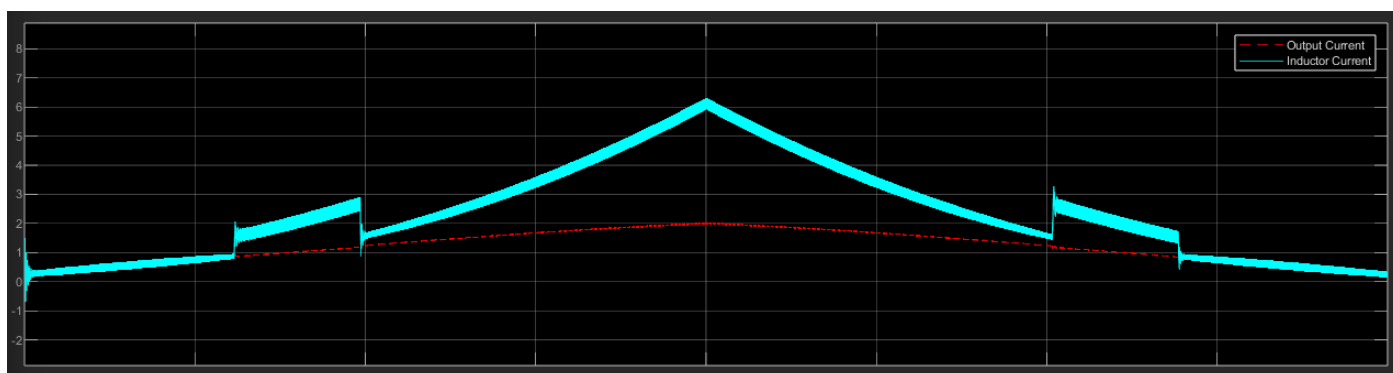
O sistema será simulado durante 4 segundos.



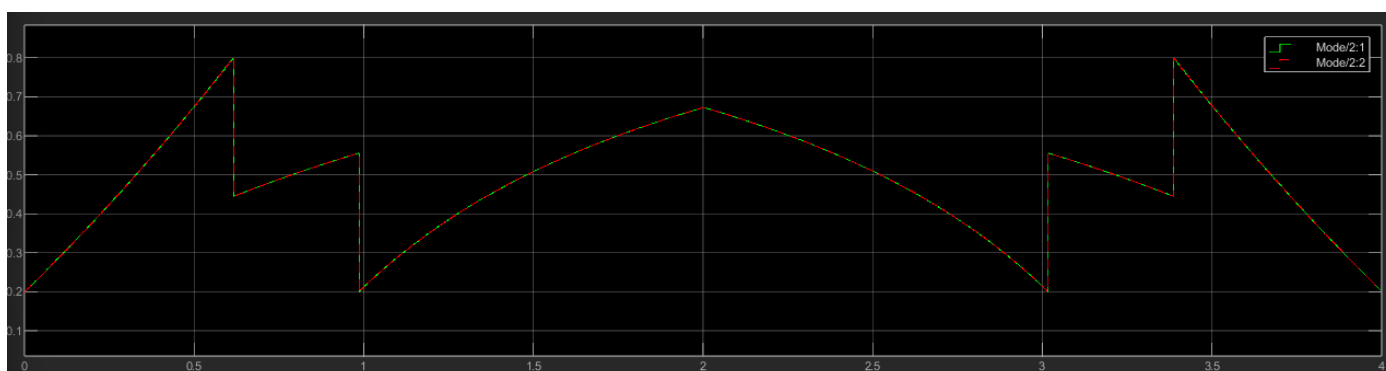
Podemos identificar facilmente os pontos de transição do modo de operação pela falta de histerese. Também se observa um erro na tensão de saída (vermelho) pela falta de um compensador.



Nota-se uma taxa de variação inicial do erro (magenta) por causa da ativação do sistema até sua operação em estado estacionário, e outras variações durante a troca de operação. O erro (vermelho) indica que o sistema não atinge e fica abaixo da tensão de referência durante seu funcionamento pela falta de um compensador.



A corrente do indutor ficou abaixo de 6 A, não levando em consideração o ripple de 0.6 A. A corrente de saída permaneceu abaixo 2 A.



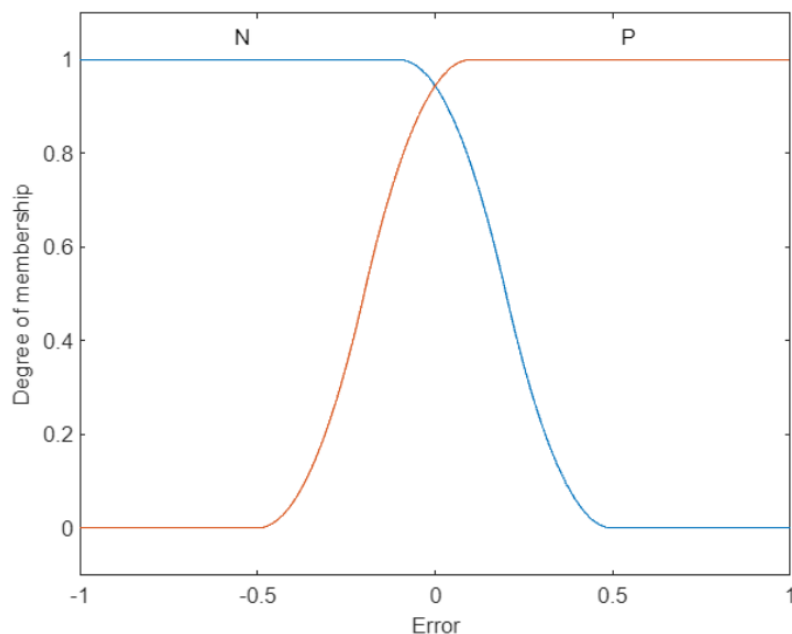
O valor do Duty Cycle obedece ao cálculo do modo de operação e se mantém no range designado anteriormente de 0.2 a 0.8. O valor do controle segue os mesmos valores pois não há um compensador implementado.

### 5.5.1 Controle

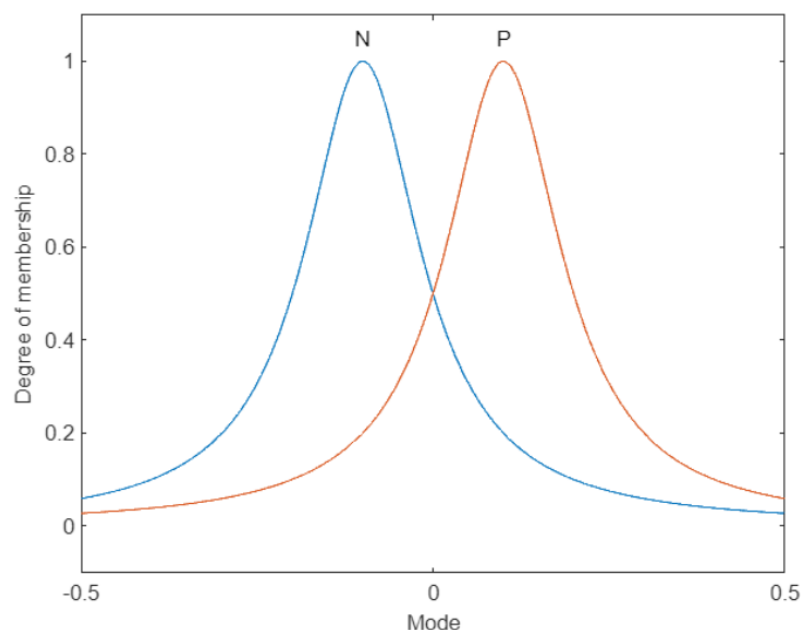
Usaremos um Fuzzy Inference System (FIS) como compensador e corrigir o erro do sistema. Sabemos que o comportamento do sistema depende do Duty Cycle, então iremos compensar esse valor e usá-la como variável manipulada.

A partir do subsistema de erro, temos que ele varia entre -1 e 1. Um erro negativo indica que a Tensão de Saída (variável controlada) está abaixo da Tensão de Referência e precisamos de uma compensação positiva no Duty Cycle, enquanto um erro positivo indica estar acima e precisamos de uma compensação negativa.

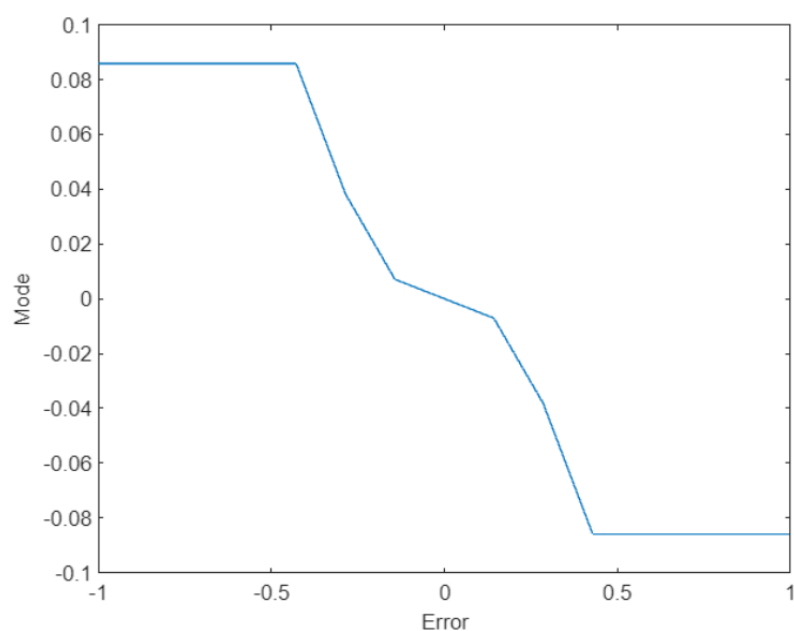
Com as informações anteriores, podemos criar um FIS com uma entrada, denominada Error, e uma saída, denominada Mode. Para determinar os pesos das entradas usaremos uma função membro em formato Z para erros negativos e uma função membro em formato S para erros positivos, conforme a abaixo.



Para determinar o ajuste na saída, usaremos uma função membro em formato de sino para saídas negativas e saídas positivas, conforme abaixo.

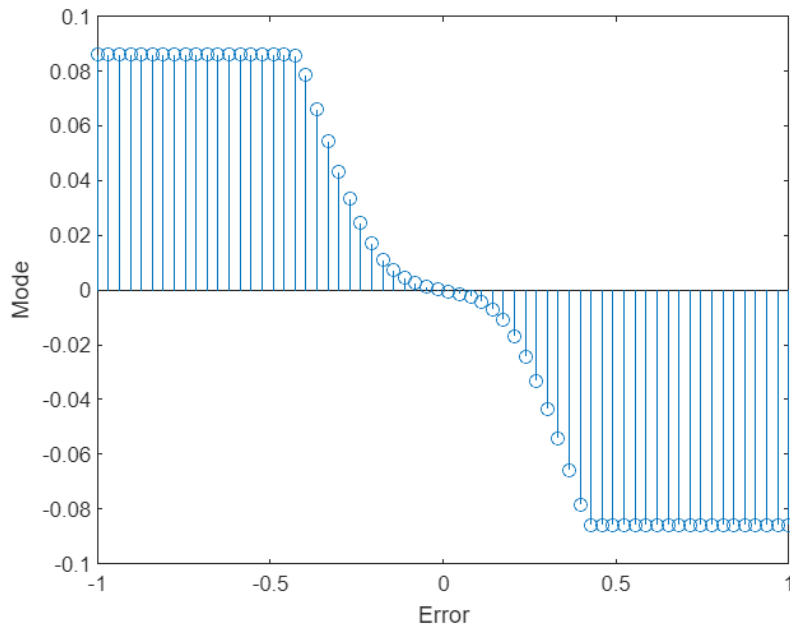


Com isso, obtemos uma superfície que descreve o comportamento do FIS.

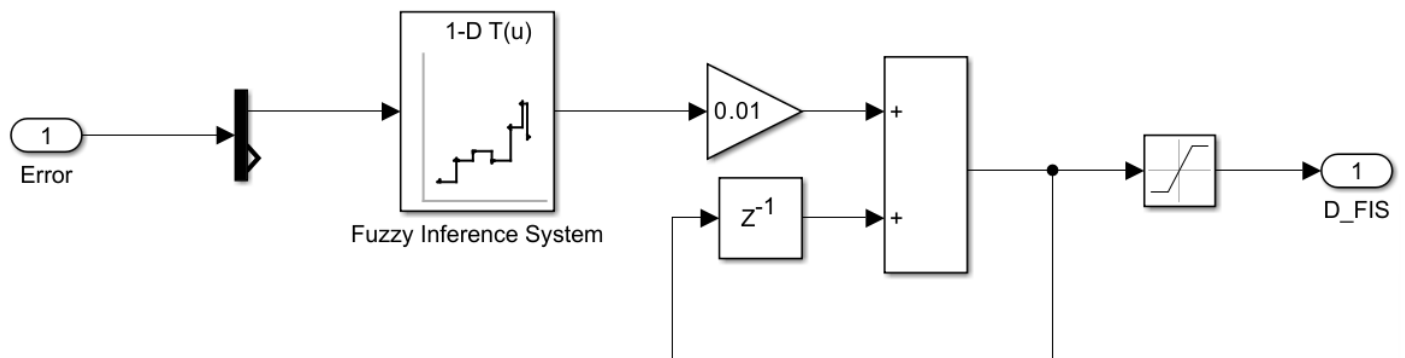


Observando o gráfico acima, percebemos que erros próximos de 0 terão poucos ajustes, enquanto erros próximos de -0.5 e 0.5 terão seus ajustes máximos. Isso reflete o erro normalizado, que cresce muito quando se afaste de 0.

Agora criaremos uma tabela verdade que irá servir de consulta para determinar a saída com base na superfície anterior, a tabela verdade terá 32 pontos.



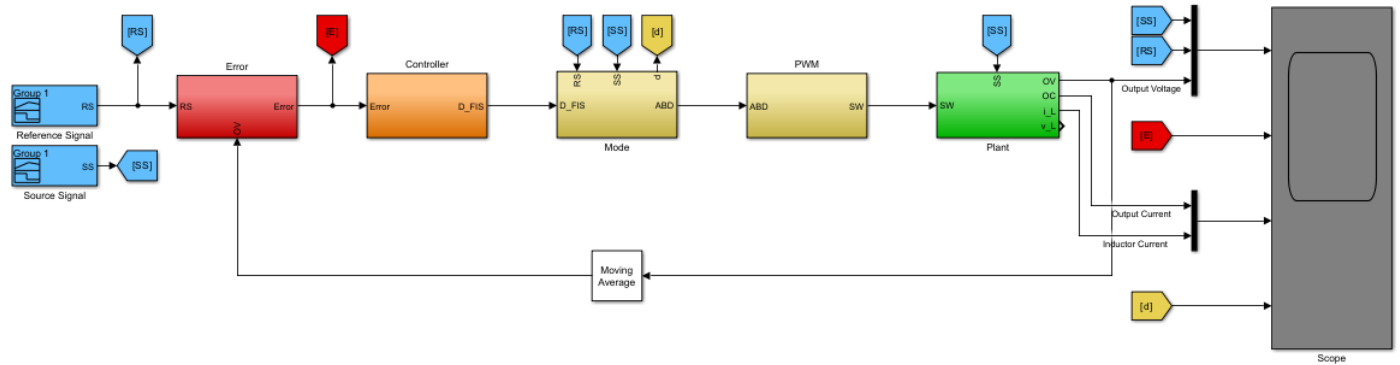
Com isso podemos criar o subsistema de controle que aplica a tabela verdade para compensar o Duty Cycle no sistema, conforme a seguir.



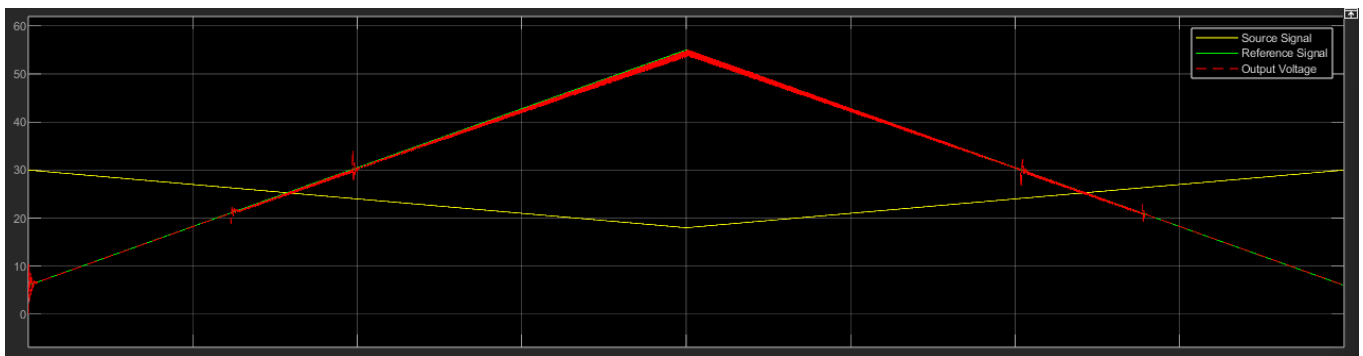
Para evitar ajustes instantâneos no sistema e instabilidade, adicionamos um integrador discreto que leva até o ponto de ajuste de forma suave. Também um saturador é utilizado para evitar acúmulo de esforço no integrador.



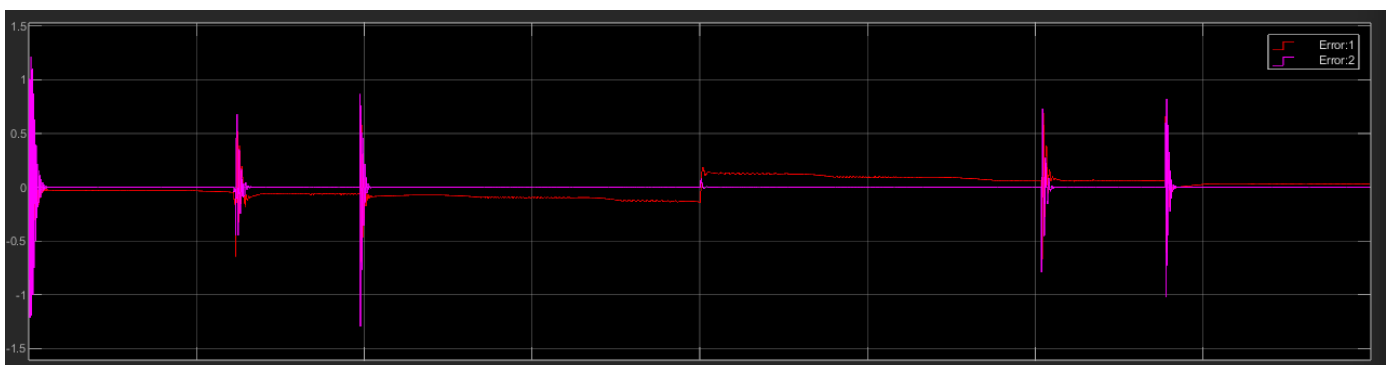
Por fim, temos o sistema completo no Simulink, conforme abaixo.



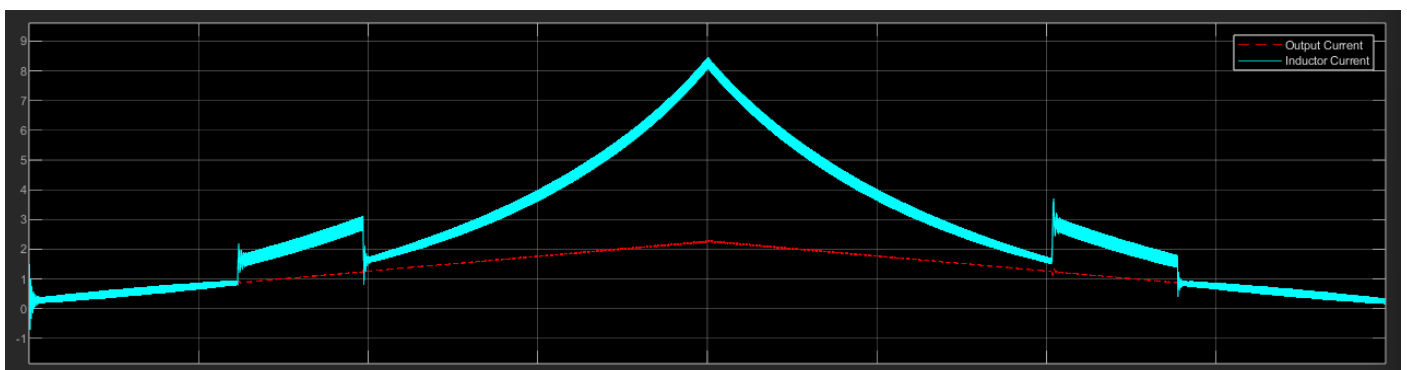
A simulação seguirá as mesmas condições anteriores, porém com a adição do controlador.



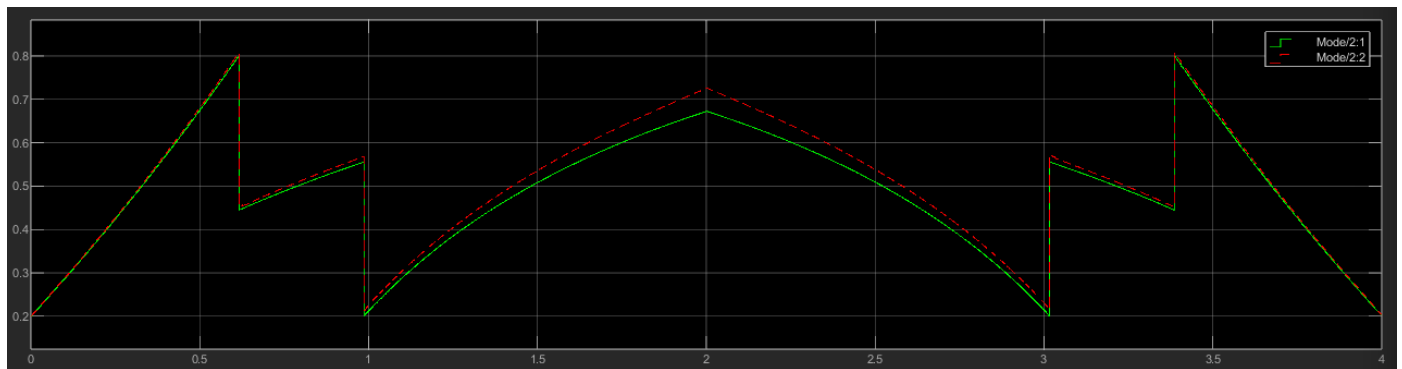
Podemos identificar facilmente os pontos de transição do modo de operação pela falta de histerese. Também se observa que a saída acompanhou a tensão de referência.



Nota-se uma taxa de variação inicial do erro (magenta) por causa da ativação do sistema até sua operação em estado estacionário, e outras variações durante a troca de operação. O erro (vermelho) indica que a saída do sistema fica próximo da tensão de referência, porém não exatamente 0, considerando o uso de um erro normalizado.



A corrente do indutor ficou abaixo de 8 A, não levando em consideração o ripple de 0.6 A. A corrente de saída permaneceu abaixo 2 A. Ou seja, pela ação do compensador houve um aumento na corrente de entrada.



O valor do Duty Cycle obedece ao cálculo do modo de operação e se mantém no range designado anteriormente de 0.2 a 0.8. O valor do controlado foi compensado, principalmente na parte com modo de operação Buck-Boost.

Com isso observamos que para realizar a correção houve um aumento na corrente de entrada, que deverá ser levado em conta no projeto.