

Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos

Aula 06: Modelagem de controle de velocidade em MITs

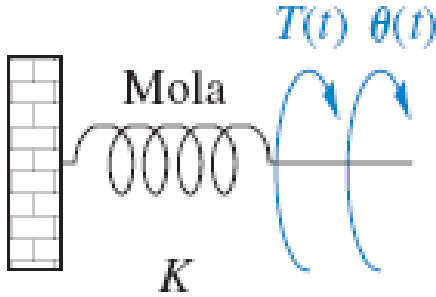
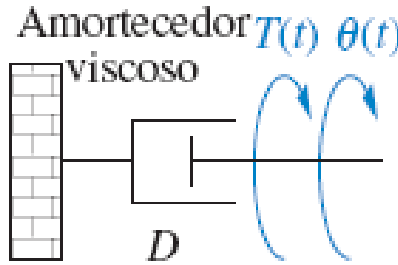
Professor Me. Renato Kazuo Miyamoto

Conceitos

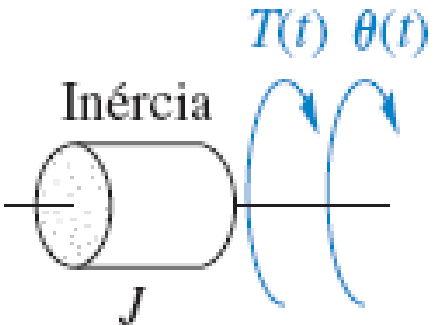
Recapitulando

Sistemas mecânicos rotacionais

- Composto por:

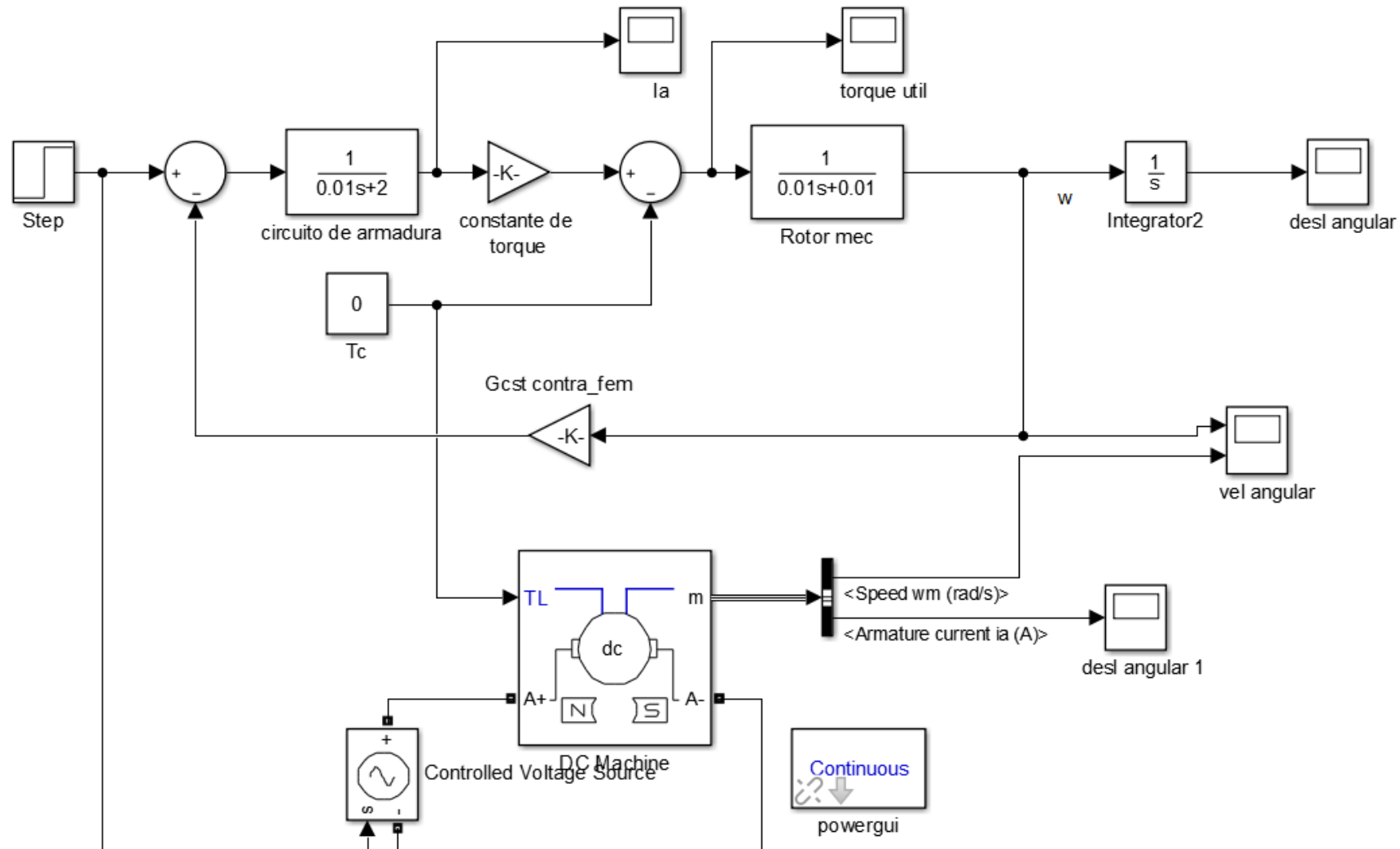
Elemento	Torque-vel. angular	Torque-desl. angular
	—	$T = K \cdot \theta(s)$
	$T = D \cdot \omega(s)$	$T = D \cdot s\theta(s)$

- Composto por:

Elemento	Força-velocidade	Força-deslocamento
	$T = J \cdot s\omega(s)$	$T = M \cdot s^2\theta(s)$

NISE (2013)

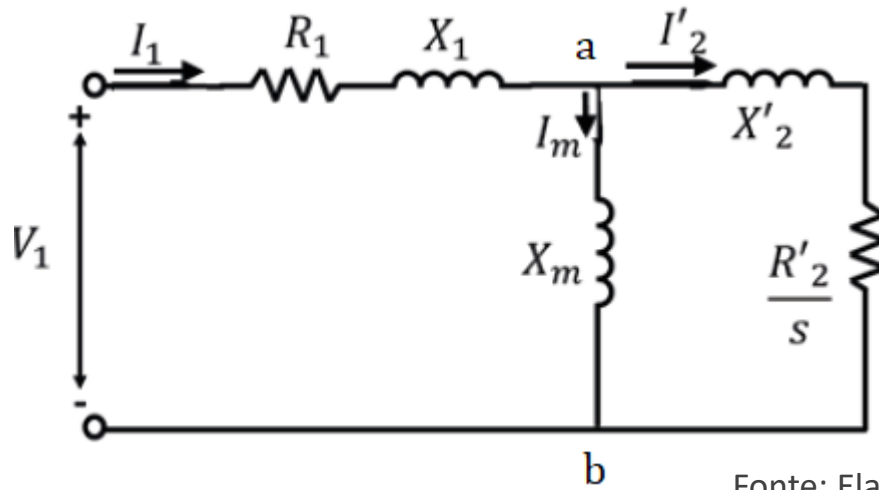
Estudo comparativo



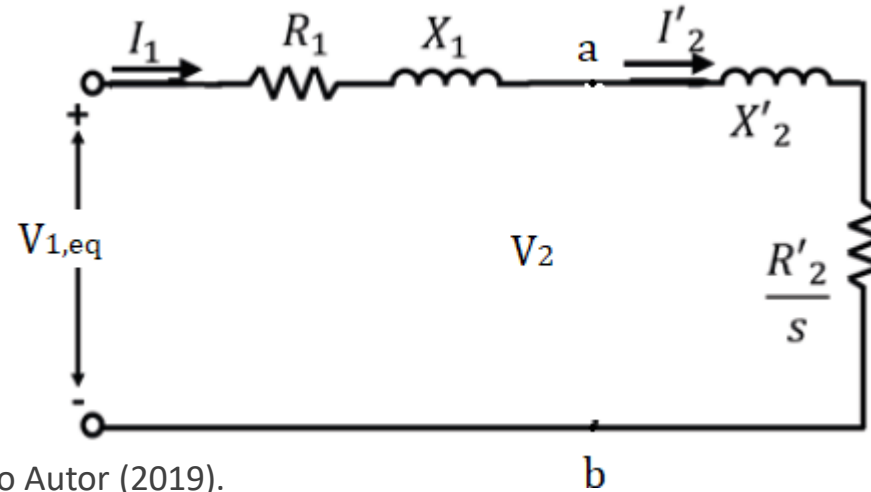
Conceitos

Modelagem matemática de sistemas com MITs

Circuito equivalente de Thévenin



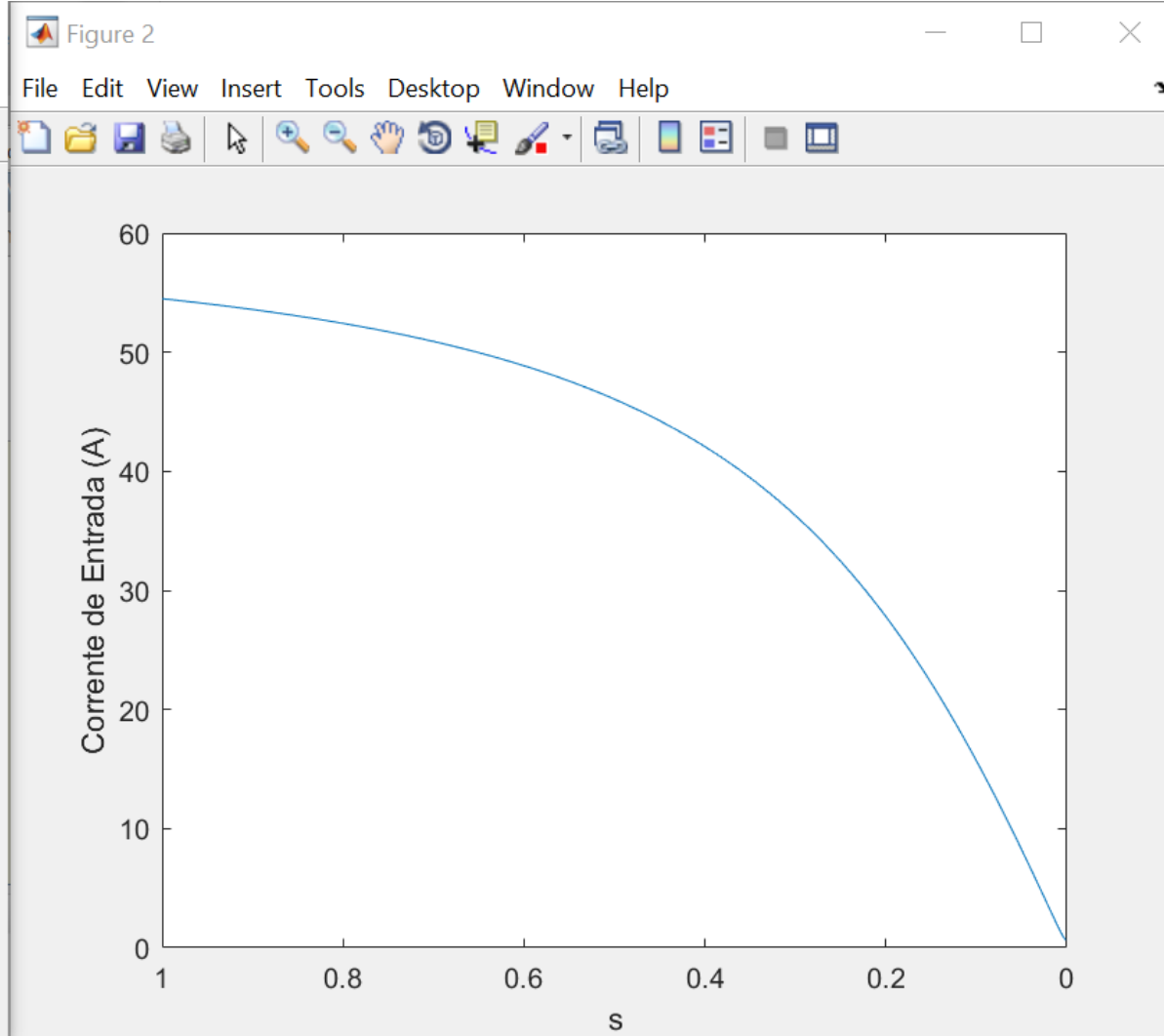
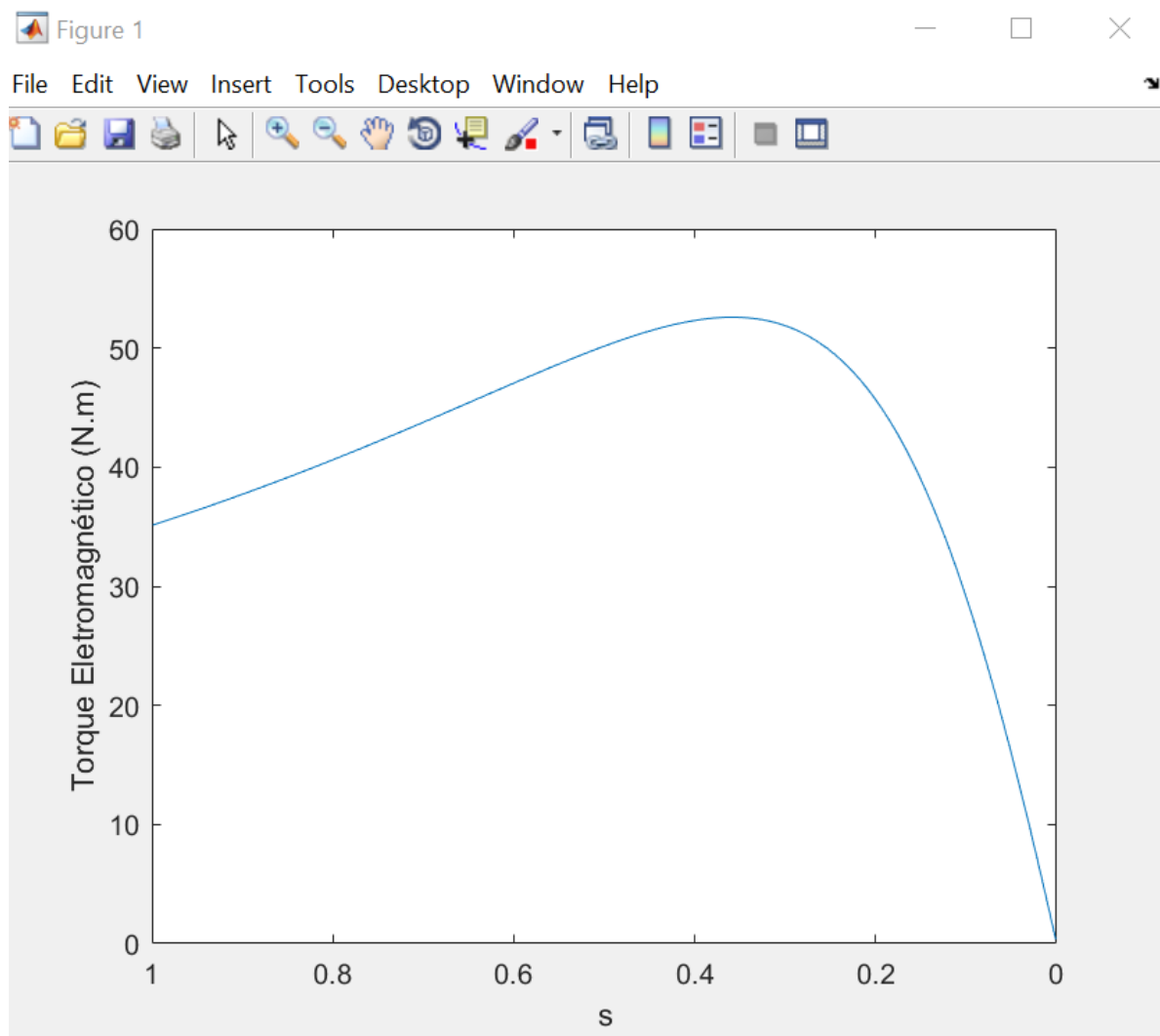
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).



$$V_2 = V_{ab} = V_1 \left(\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right)$$

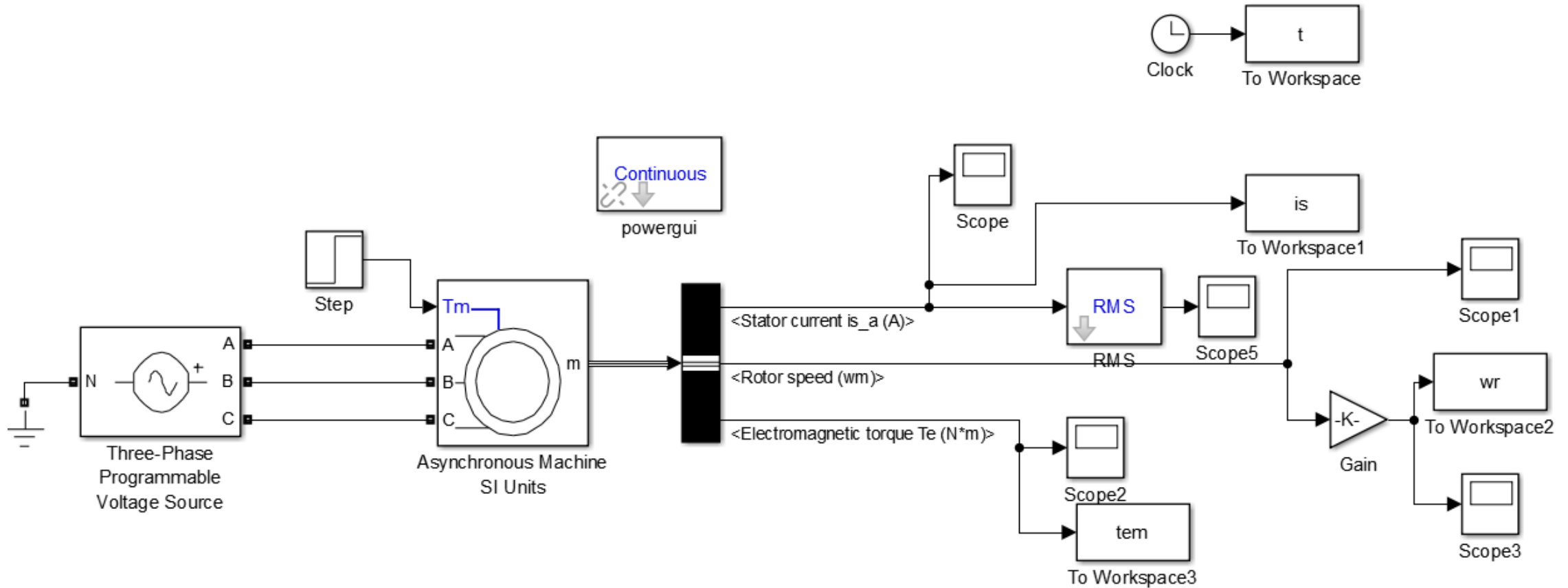
$$V_{th} = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_1$$

$$Z_{1eq} = R_{1eq} + jX_{1eq} = (R_1 + jX_1) // jX_m \quad Z_{1eq} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$




Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Modelo da máquina de Indução



MIT 4HP

 Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

ConfigurationParametersAdvancedLoad Flow

Rotor type:

Squirrel-cage

Preset parameters

Squirrel-cage preset model: No

Double squirrel-cage preset model: Open parameter estimator

Mechanical input:

Torque Tm

Reference frame:

Stationary

Measurement output

☐ Use signal names to identify bus labels

Configuration	Parameters	Advanced	Load Flow
Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]			
[2984 220 60]			
Stator resistance and inductance[Rs(ohm) Lls(H)]:			
[0.325 0.003]			
Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:			
[0.75 0.0025]			
Mutual inductance Lm (H):			
0.5291			
Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:			
[0.0271 0.005 2]			
Initial conditions			
[1 0 0 0 0 0 0 0]			

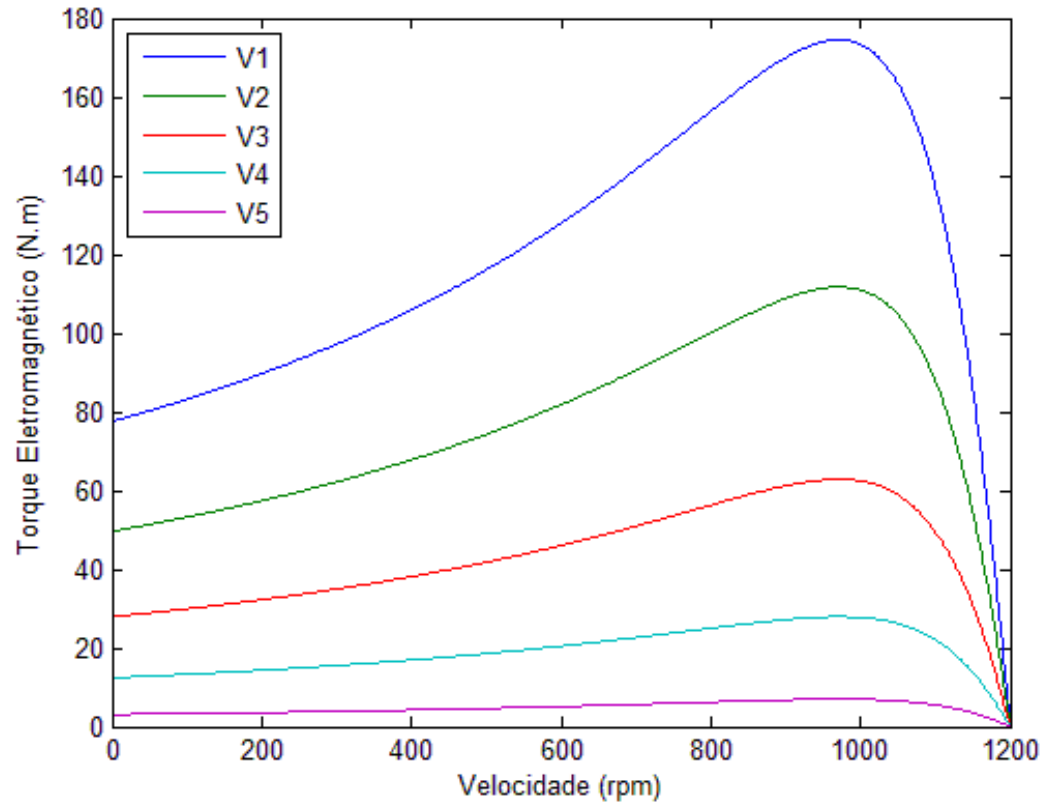
Controle escalar de velocidade em MITs

Controle de velocidade em máquinas de indução

Escalar: Controle via tensão do estator

- Varia a tensão do estator mantendo a frequência constante;
- Pode ser controlado por um controlador CA a tiristores ou inversor 3~;
- Usado extensivamente como dispositivo “*soft-starter*” para motores de indução de velocidade constante;
- Aumento da faixa de velocidade é feito a custo da redução do torque máximo.

Controle de velocidade em máquinas de indução



Escalar: Controle via tensão do estator

$V1 > V2 > V3 > V4 > V5$

Controle de velocidade em máquinas de indução

Escalar: Controle via tensão do estator

Vantagens: Simples implementação;

Desvantagens: i) Não é recomendado para cargas que necessitem de torque constante nem elevados conjugados de partida; ii) Faixa de ajuste de velocidade relativamente estreita;

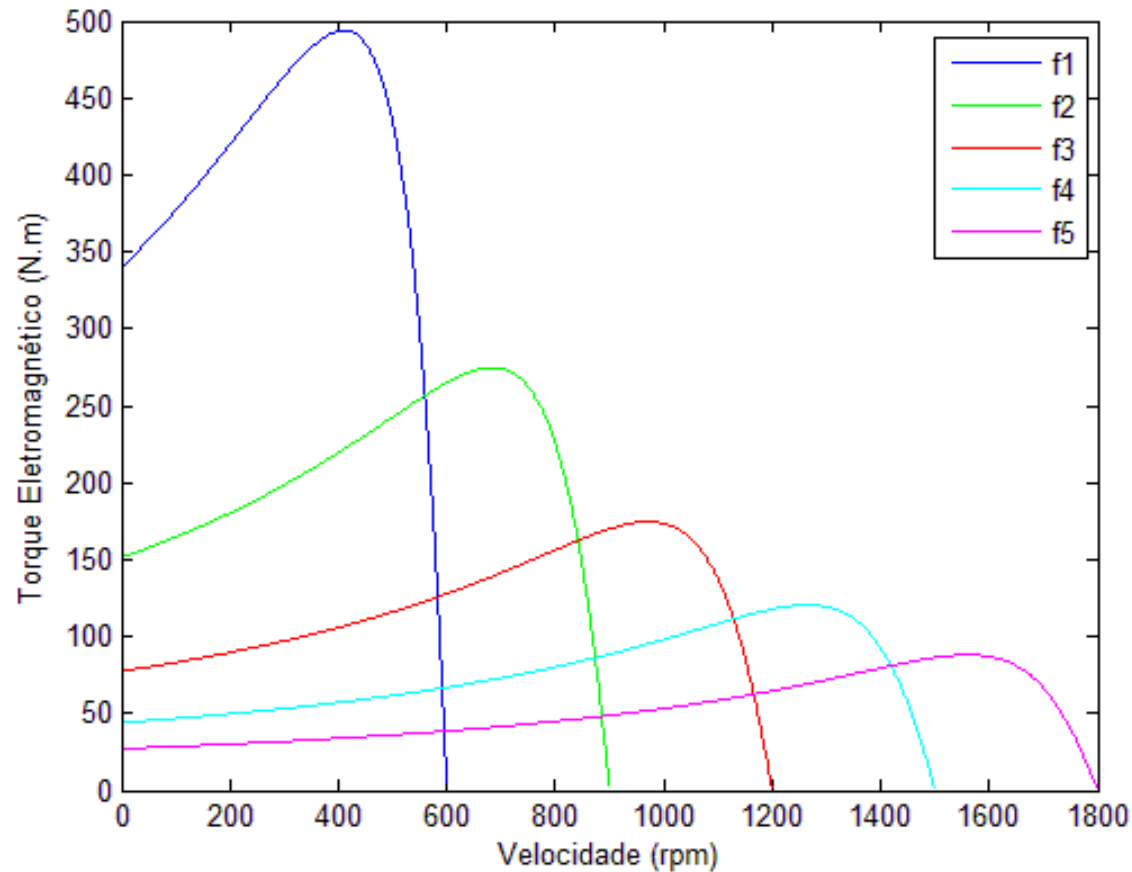
Aplicações: Sistemas de baixo desempenho e potência, como ventiladores e bombas centrífugas (baixo torque de partida).

Controle de velocidade em máquinas de indução

Escalar: Controle via frequência de entrada

- Permite controle de torque e velocidade;
- O fluxo aumenta para uma diminuição da frequência à tensão constante;
- Para baixas frequências, as reatâncias diminuem , aumentando significativamente a corrente;
- Não é um controle comumente utilizado.

Controle de velocidade em máquinas de indução



Fonte: Adaptado notas aula Castoldi (2019).

Escalar: Controle via frequência de entrada

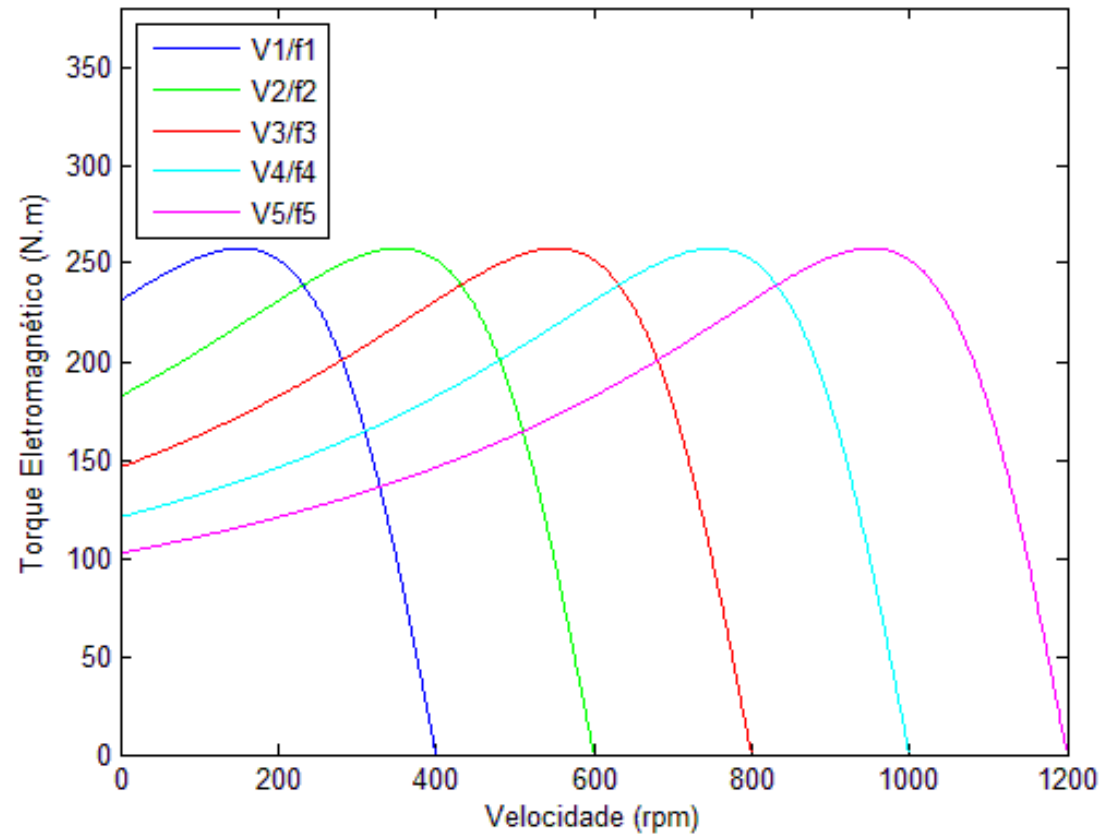
$$f1 < f2 < f3 < f4 < f5$$

Controle de velocidade em máquinas de indução

Escalar: Razão V/f constante

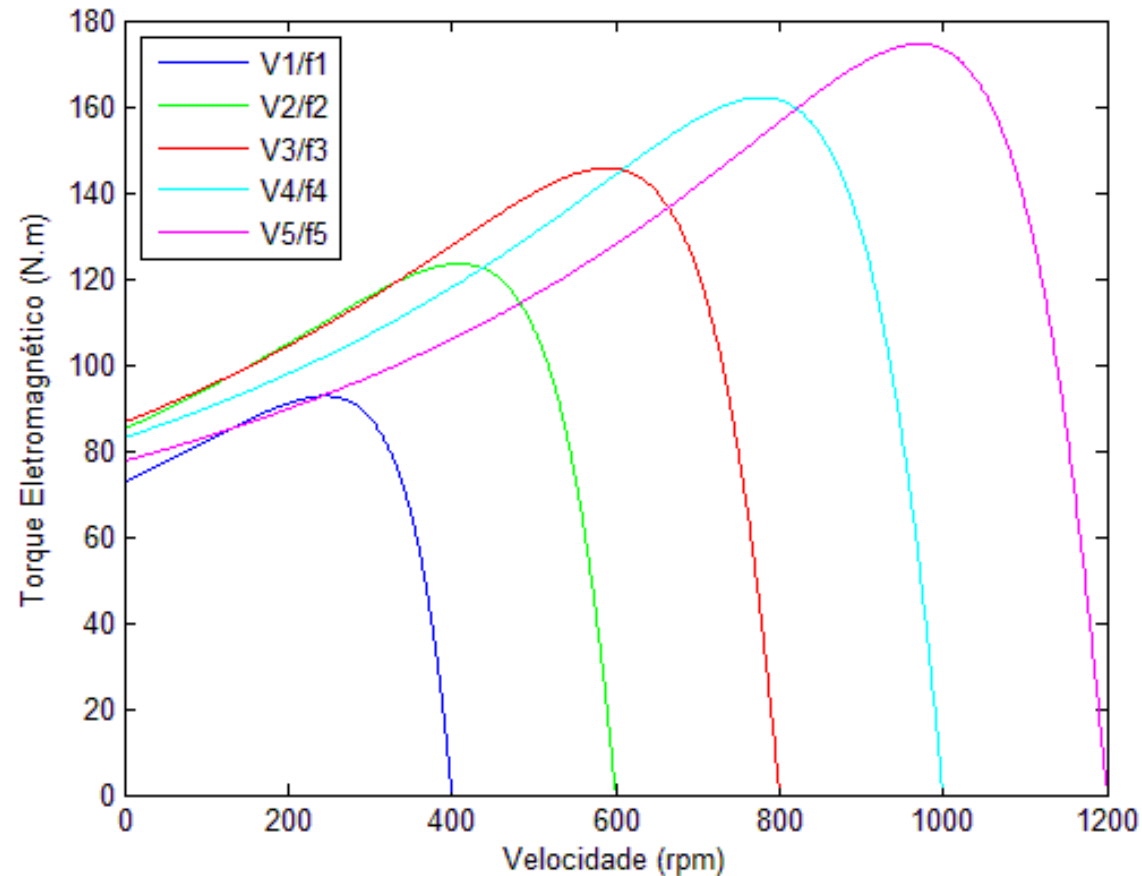
- Método de controle de velocidade mais popular;
- Para baixas frequências é necessária uma tensão adicional (*boost*) para compensar a queda de tensão na resistência estatórica;
- O fluxo no entreferro da máquina é proporcional à relação Volts/Hertz.

Controle de velocidade em máquinas de indução



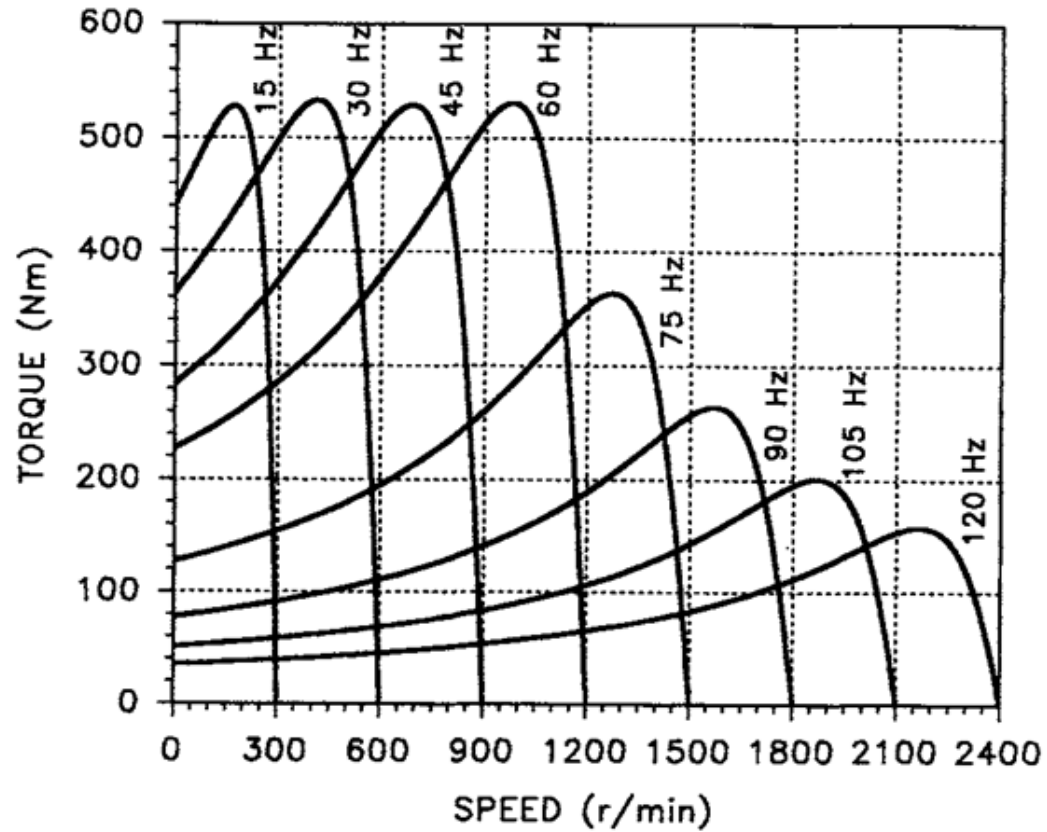
Escalar: Razão V/f constante
- Com *boost*;

Controle de velocidade em máquinas de indução

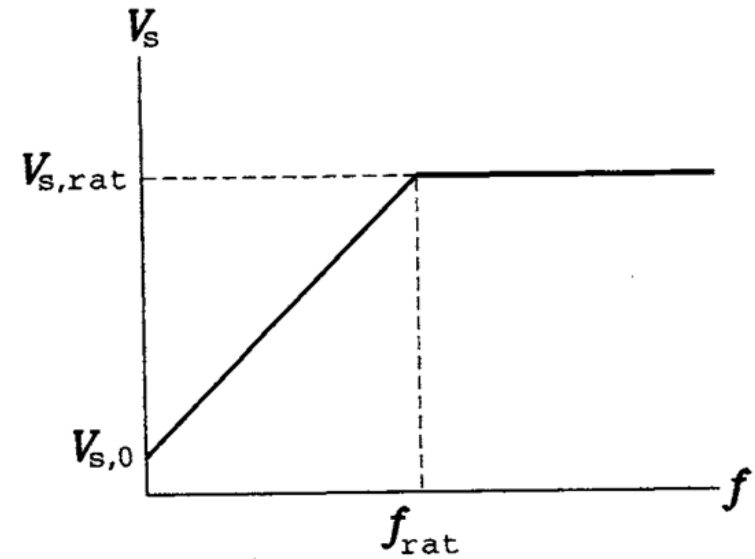


Escalar: Razão V/f constante
- Sem *boost*;

Controle escalar



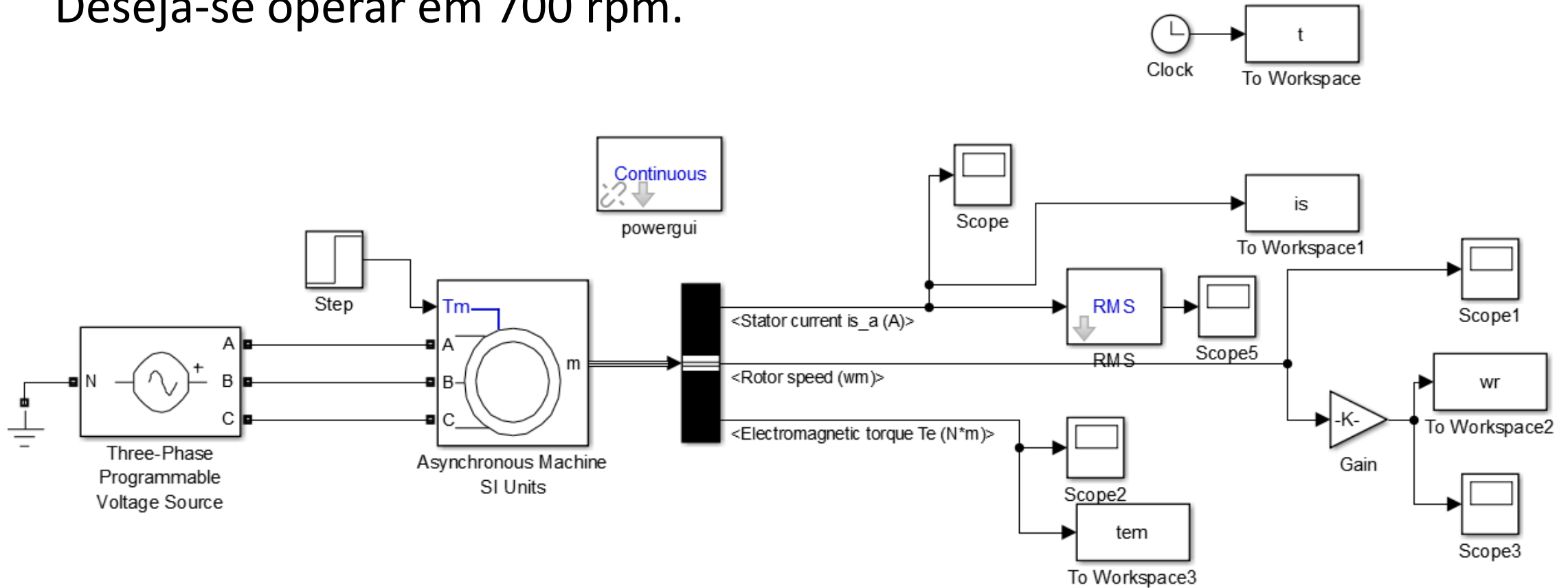
Fonte: Adaptado notas aula Castoldi (2019).



Fonte: Adaptado notas aula Castoldi (2019).

Modelo da máquina de Indução

Deseja-se operar em 700 rpm.

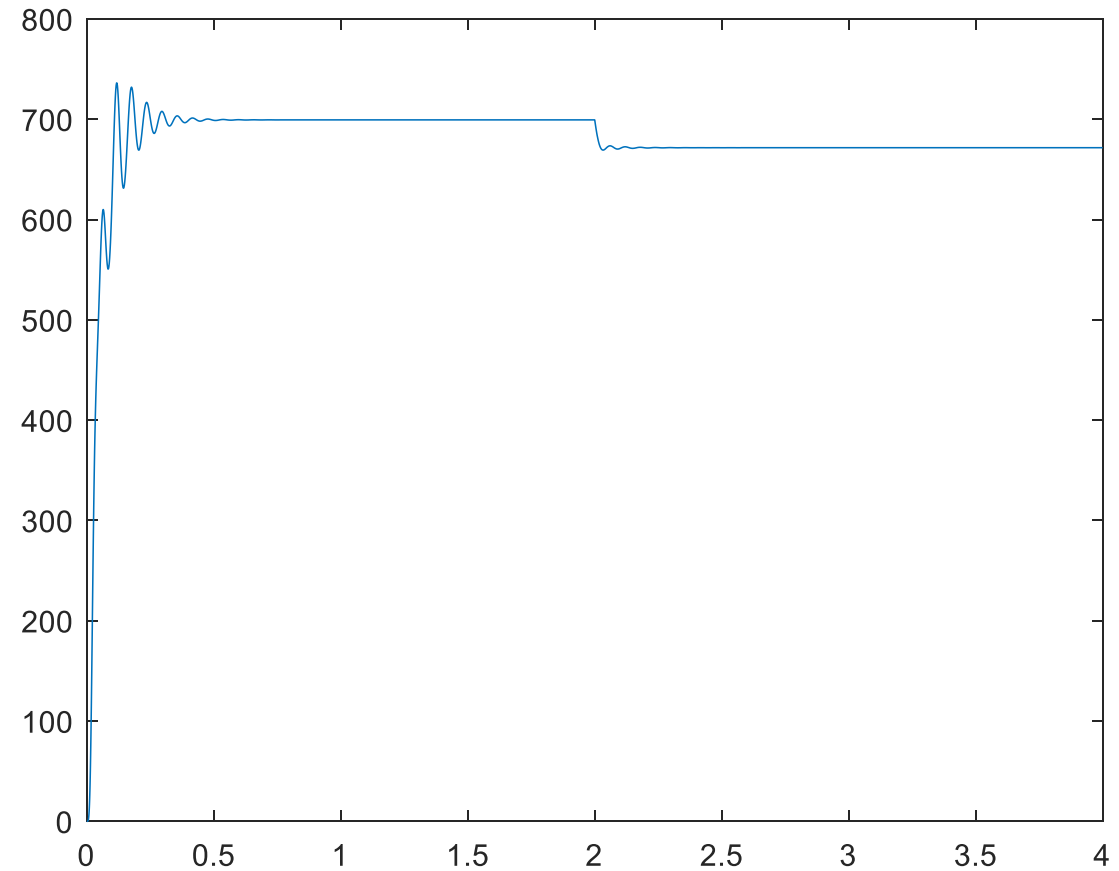


Deseja-se operar em 700 rpm.

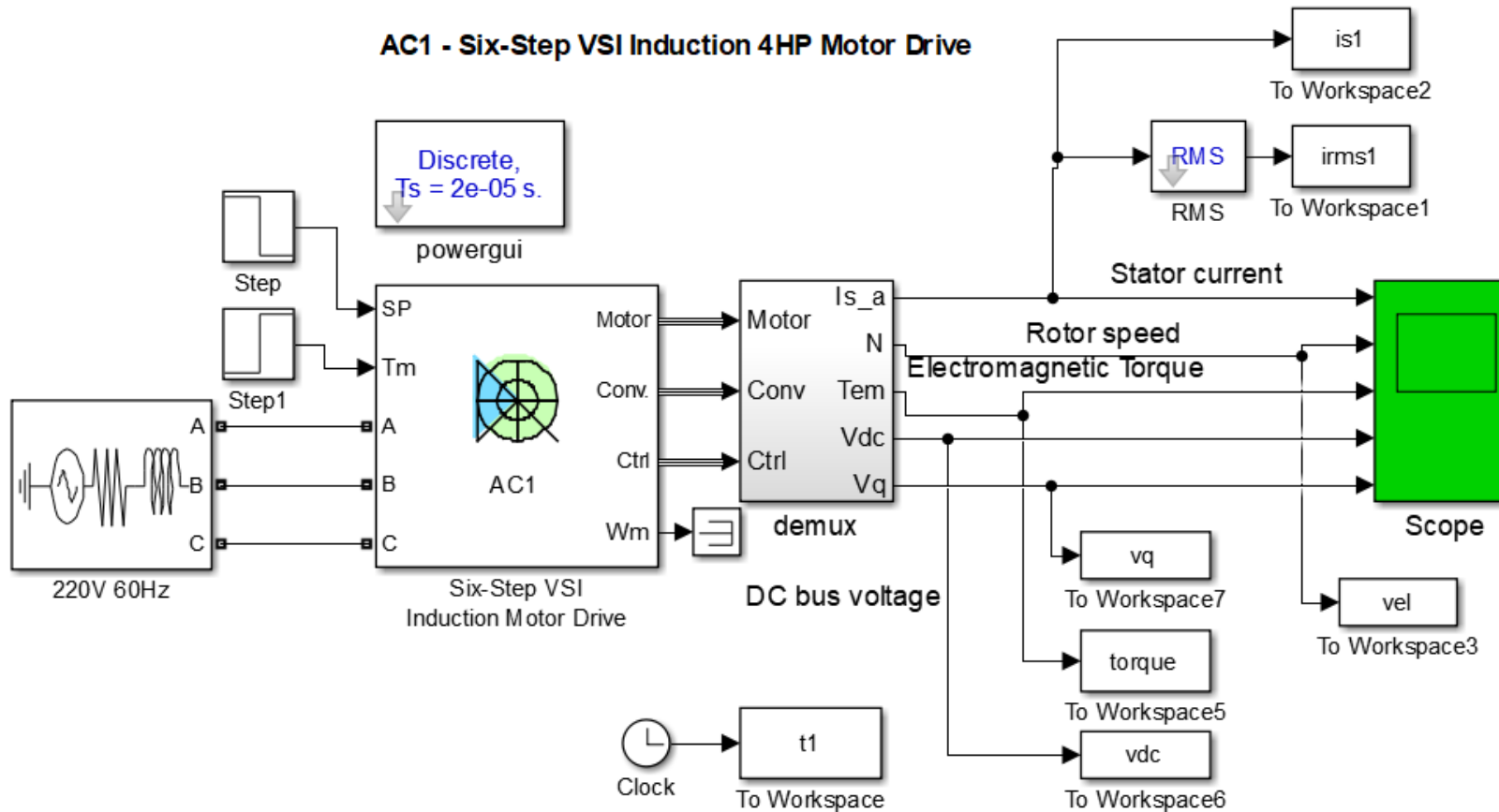
$V=85,55V$

$f=23,33\text{ Hz}$

$T=0$ (no instante $2s \rightarrow T=5N.m$)



Controle escalar malha aberta

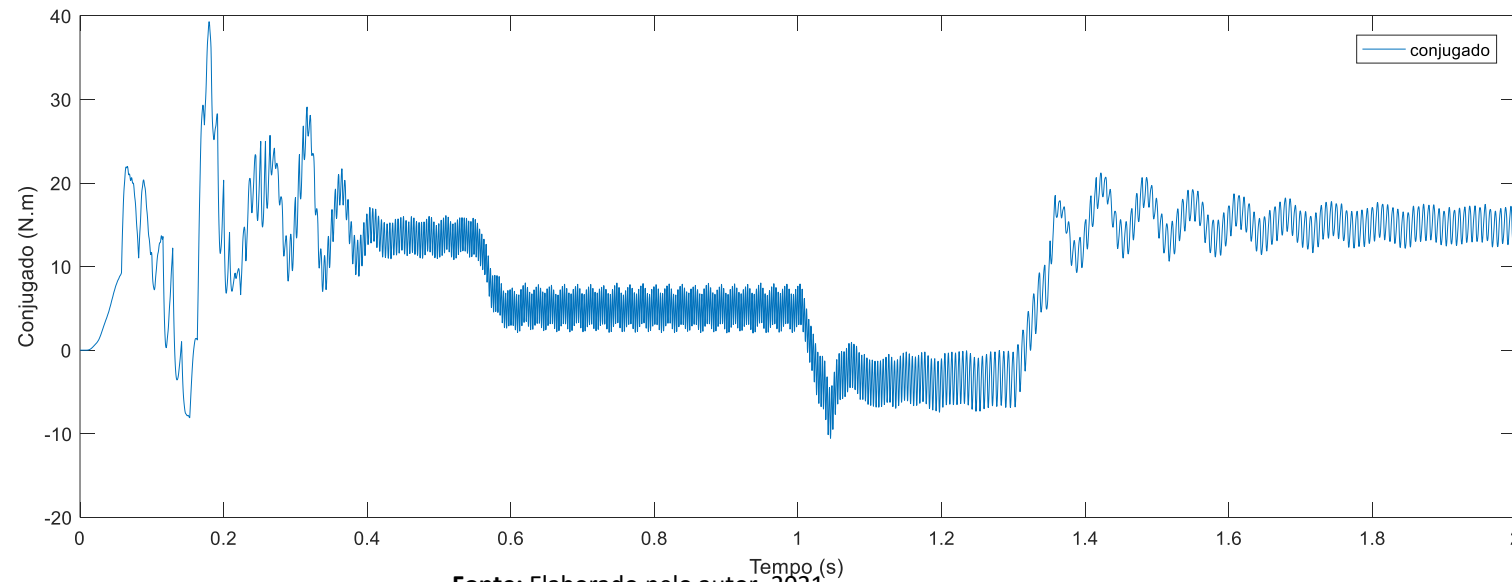
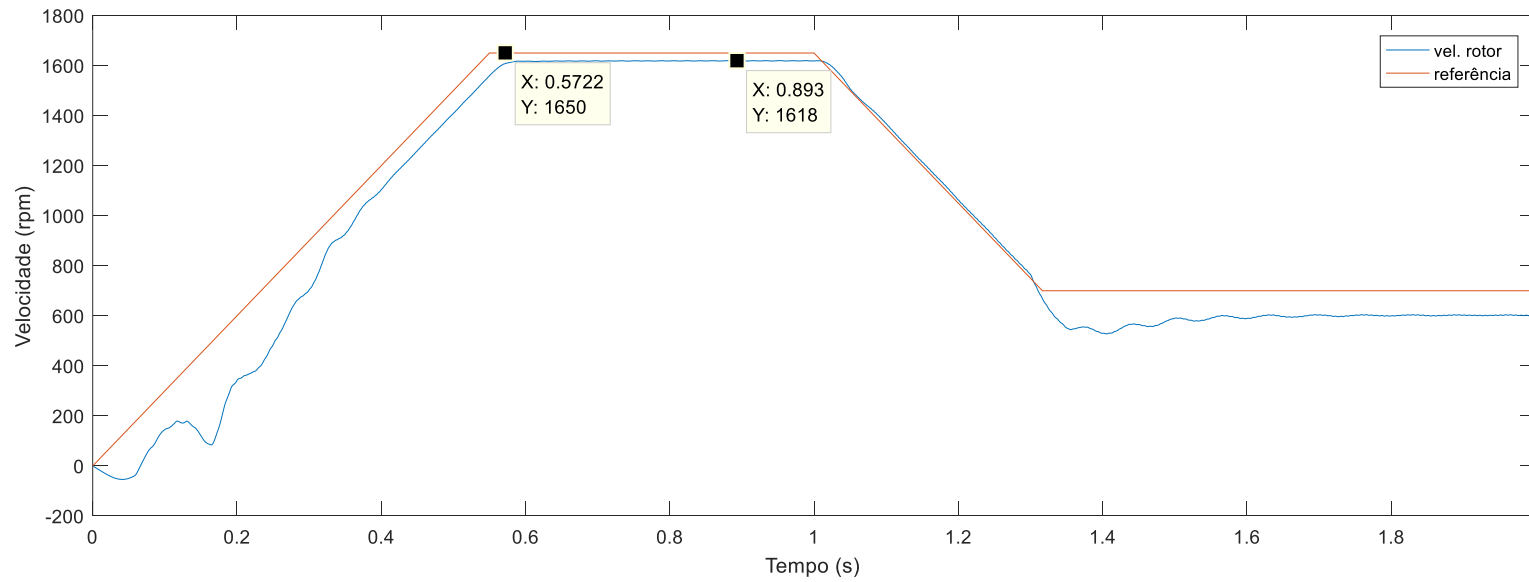


Motor 4 HP

Ref. Velocidade 1650 rpm e
700 rpm (1s)

Ref. Conjugado 5 N.m e 15 N.m (1,3s)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Comportamento
da velocidade e
conjugado.

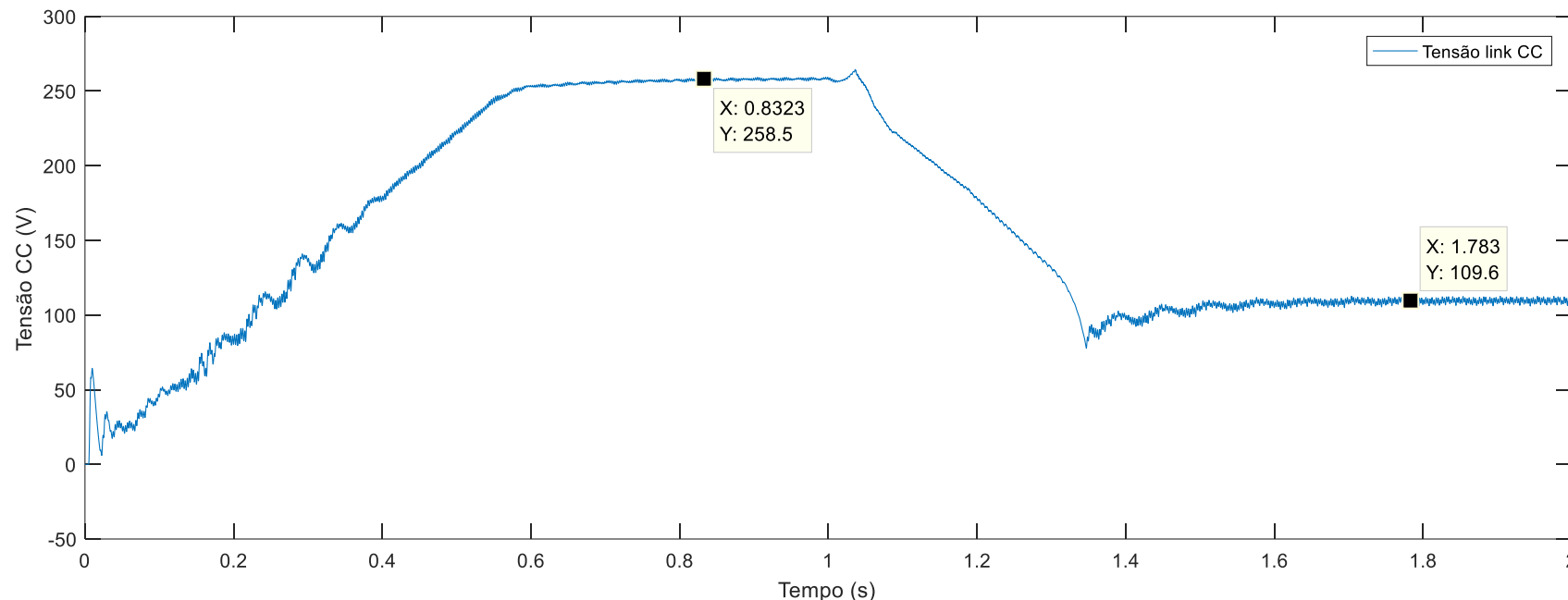
Relação V/f *

$$V_{dc} = \frac{V_{ph}}{0,45} = 282,82V$$

$$\frac{V}{f} = \frac{282,82}{60} = 4,7 V/Hz$$

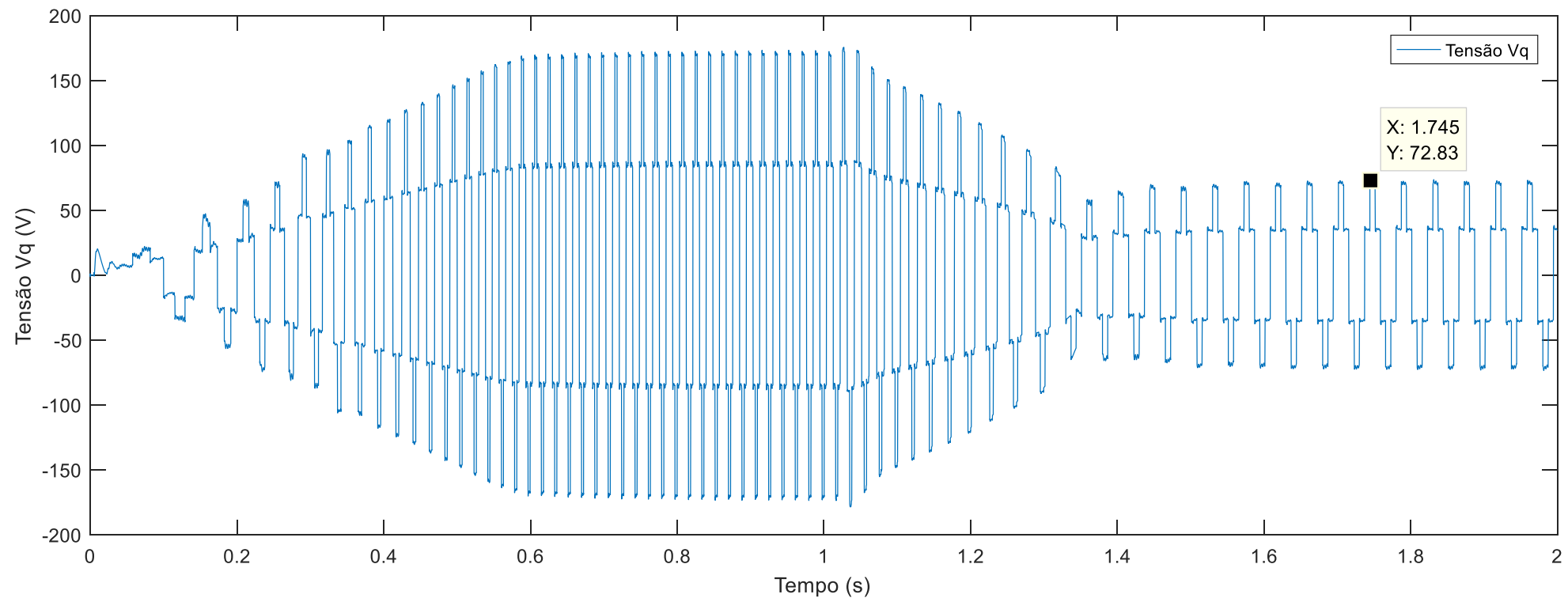
Para 1650 rpm $\rightarrow 1650/1800=0,916$ logo
 $0,916*60=55\text{Hz} * 4,7 = 258,5\text{Vdc}$

Para 700 rpm $\rightarrow 700/1800=0,388$ logo
 $0,388*60=23,33\text{Hz} * 4,7 = 109,66\text{Vdc}$



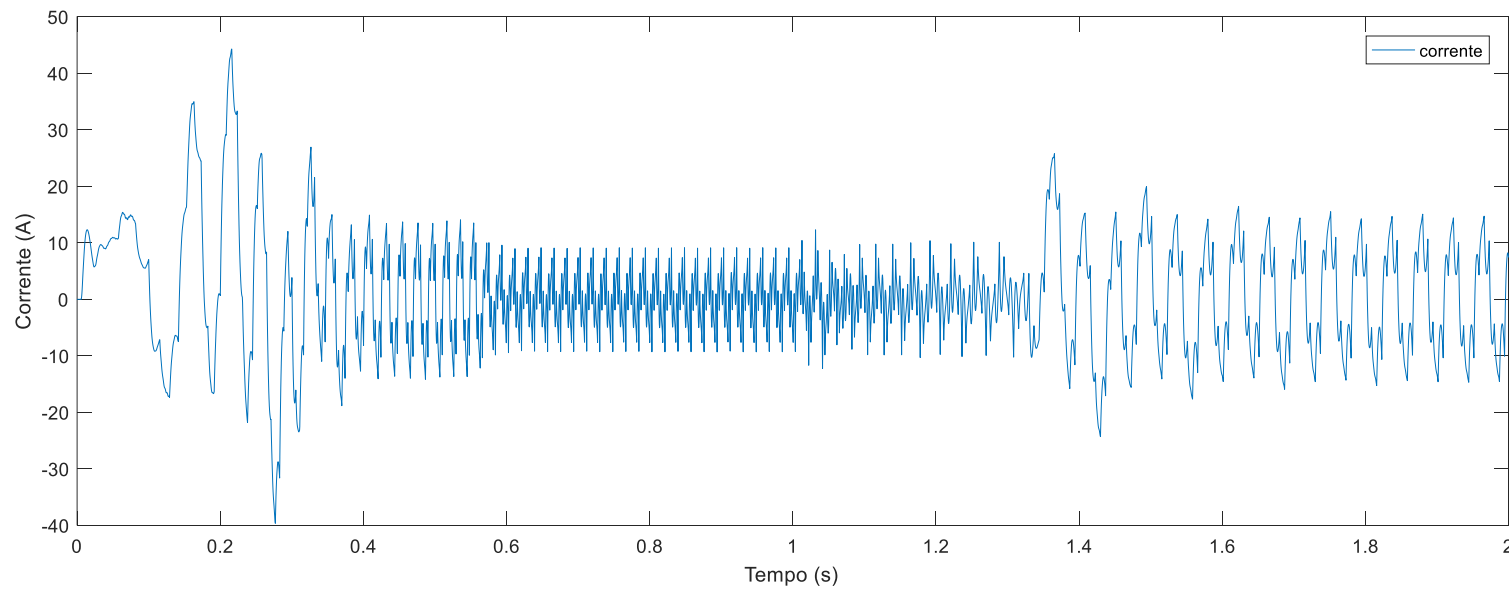
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

$$V_p = \frac{2}{3} V_{dc}$$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

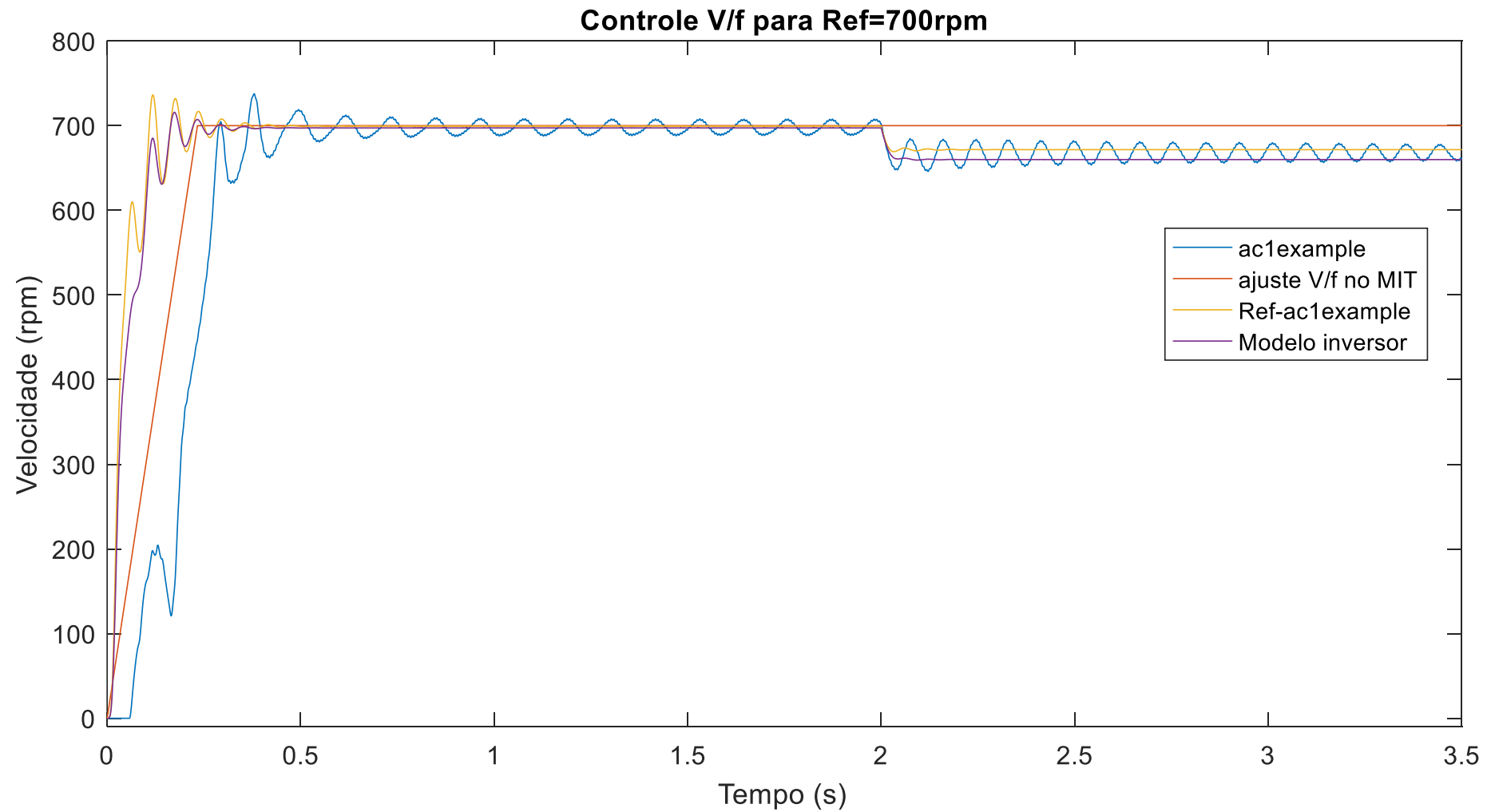
FFT para 1,5s (9 ciclos).



0 Hz	(DC) :	0.20%	90.0°
2.59256 Hz		0.88%	170.9°
5.18511 Hz		3.20%	159.4°
7.77767 Hz		11.08%	97.9°
10.3702 Hz		4.64%	11.2°
12.9628 Hz		2.44%	-5.3°
15.5553 Hz		2.08%	-14.4°
18.1479 Hz		0.75%	-54.3°
20.7404 Hz		0.63%	251.7°
23.333 Hz	(Fnd) :	100.00%	155.8°
25.9256 Hz		2.18%	70.7°
28.5181 Hz		1.61%	51.9°
31.1107 Hz		1.34%	38.1°
33.7032 Hz		1.20%	35.1°
36.2958 Hz		1.45%	43.1°
38.8883 Hz		1.81%	-8.7°
41.4809 Hz		0.85%	-2.6°
44.0734 Hz		0.73%	-1.1°

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Estudo comparativo



Referências

- OGATA, K. – **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice-Hall. Rio de Janeiro, 1982.
- COUGHANOWR e KOPPEL - **Process Systems Analysis and Control**. McGraw Hill, 1991.
- COUGHANOWR e KOPPEL - **Análise e Controle de Processos**. Editora Guanabara, 1987.
- KLUEVER, C. A. **Sistemas dinâmicos: modelagem, simulação e controle**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.