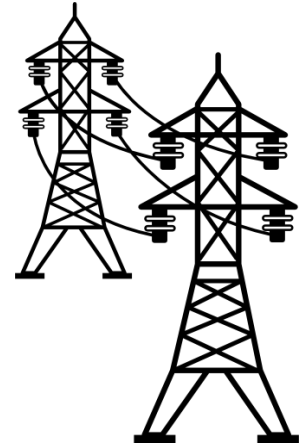




EIE

Escuela de
Ingeniería Eléctrica



IE-0469 Sistemas de Potencia I

Presentación #2 Modelos de cargas

Dr. Andrés Argüello Guillén
andres.arguelloguillen@ucr.ac.cr

Sistemas de Potencia I

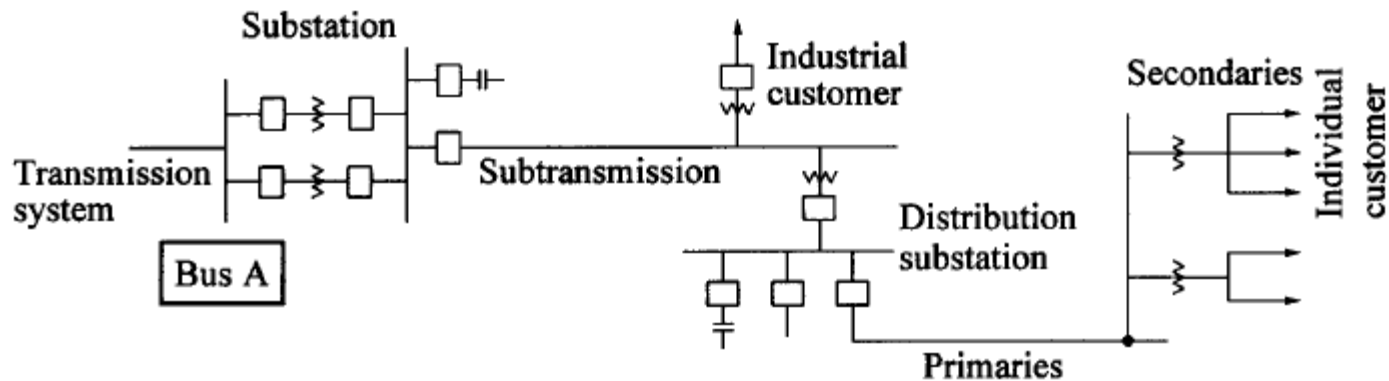


- Cálculo I
- Cálculo II
- Álgebra lineal
- Circuitos lineales I
- Matemática superior
- Circuitos lineales II
- Electromagnetismo
- Análisis de sistemas
- Máquinas eléctricas I
- Máquinas eléctricas II
- Transmisión de Potencia
- Sistemas de Control

Power System Stability and Control (Kundur)

Capítulo 7 Power System Loads

Modelos de carga compuesta (conjuntos de componentes)



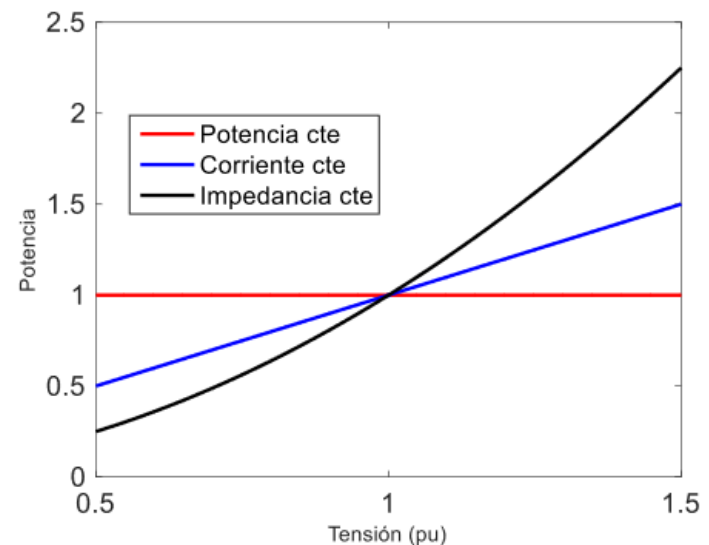
Modelado de cargas estáticas

La mayoría de las cargas eléctricas **dependen de la tensión de operación**.
La demanda se representa con el **modelo exponencial**:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta$$

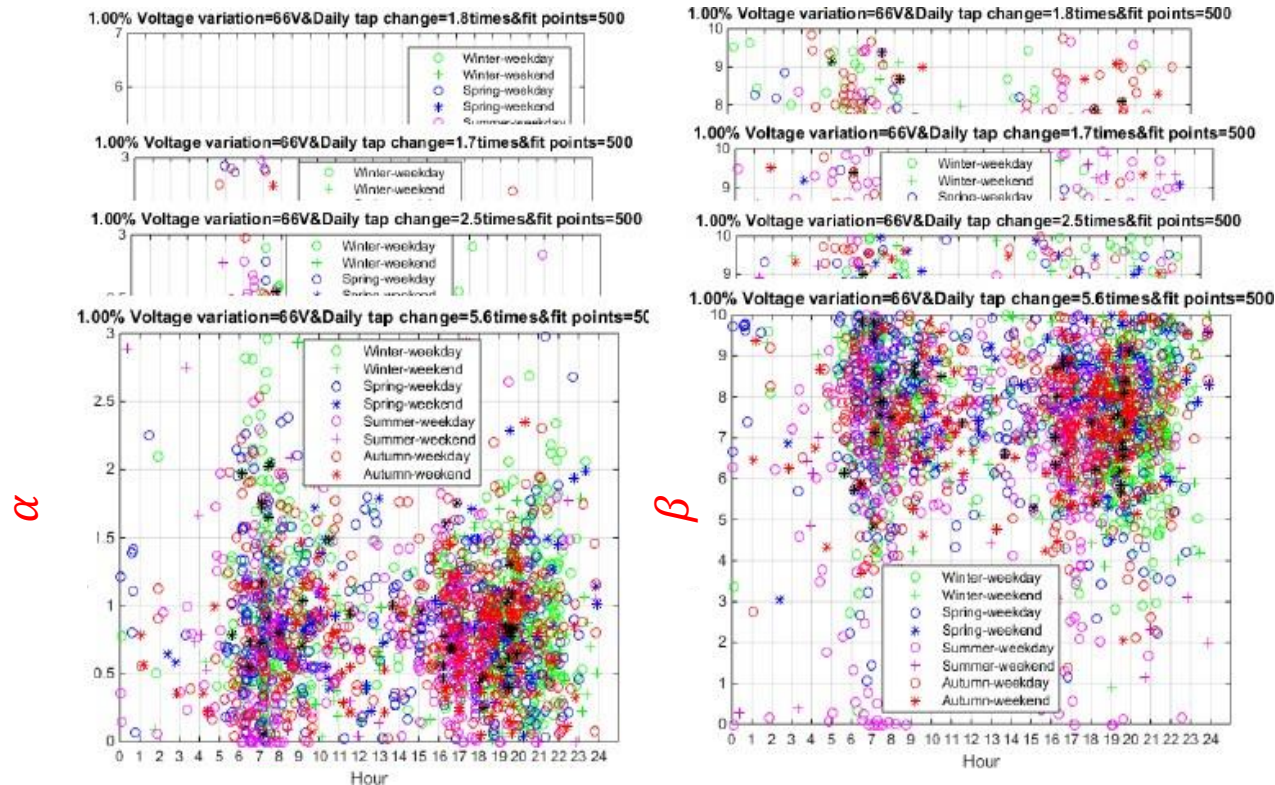
donde

P	Potencia activa demandada por la carga
Q	Potencia reactiva demandada por la carga
P_0	Potencia activa a una tensión V_0
Q_0	Potencia reactiva a una tensión V_0
V_0	Tensión inicial de la carga
α	Exponente de potencia activa
β	Exponente de potencia reactiva



$\alpha, \beta = 0$	Carga tipo potencia constante
$\alpha, \beta = 1$	Carga tipo corriente constante
$\alpha, \beta = 2$	Carga tipo impedancia constante

Coeficientes α y β (de medición)



Típicamente:

$$0.5 < \alpha < 1.8$$

$$1.5 < \beta < 6$$

Modelo ZIP

Cuando la carga tiene componentes de potencia constante, corriente constante e impedancia constante, se usa **modelo ZIP**:

$$P = P_0 \left(\underset{\text{Z}}{a_0} + \underset{\text{I}}{a_1} \left(\frac{V}{V_0} \right) + \underset{\text{P}}{a_2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right)$$

$$Q = Q_0 \left(\underset{\text{Z}}{b_0} + \underset{\text{I}}{b_1} \left(\frac{V}{V_0} \right) + \underset{\text{P}}{b_2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right)$$

Donde los coeficientes a_i y b_i conforman el 100% de la demanda original P_0 y Q_0 , es decir:

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1$$

Ejemplo

Una carga demanda $P_0 = 100 \text{ MW}$ a una tensión de $V_0 = 1.02 \text{ p.u.}$. Si la tensión disminuyó a 0.98 p.u. , determine la nueva demanda si sabe que la carga es 10% P_{cte} , 30% I_{cte} y 60% Z_{cte} .

Solución:

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right)$$

$$a_0 = 0.10, a_1 = 0.3, a_2 = 0.6$$

Entonces,

$$P = 100 \left(0.1 + 0.3 \left(\frac{0.98}{1.02} \right) + 0.6 \left(\frac{0.98}{1.02} \right)^2 \right) = 94.21 \text{ MW}$$

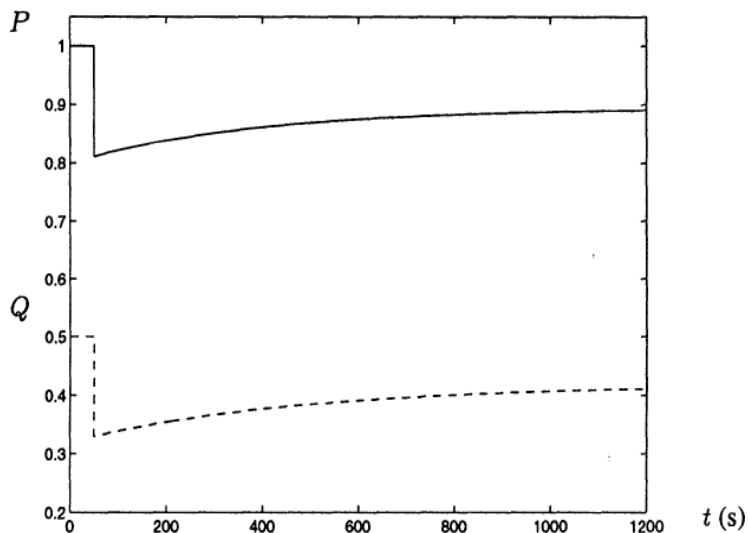
Ejemplo

Una carga demanda $P_0 = 100 \text{ MW}$ a una tensión de $V_0 = 1.00 \text{ p.u.}$. Si la tensión aumentó a 1.035 p.u. , determine la nueva demanda si sabe que la carga es 10% P_{cte} y 90% Z_{cte} .

Modelado de cargas dinámicas

Utilizado para **modelar la respuesta de la demanda** de las cargas después de una perturbación que afectó a V o f .

Necesarios para modelo de grandes cantidades de motores (60%-70% de la carga mundial), oscilaciones interárea, estabilidad de tensión



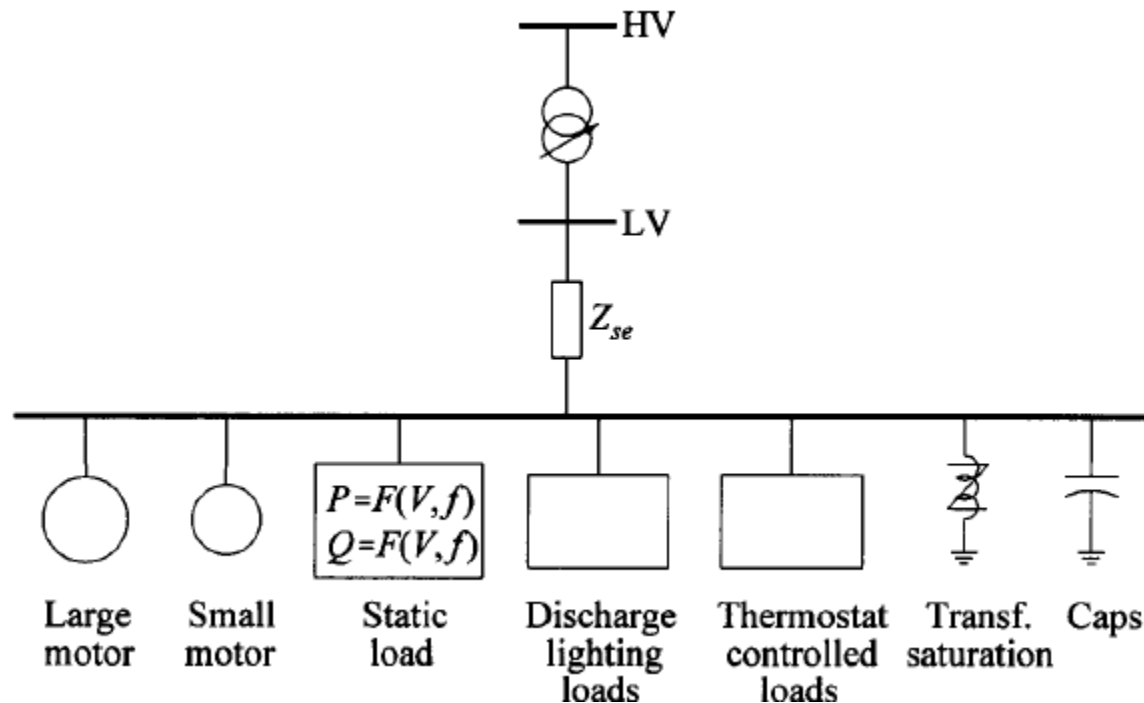
$$P = P_0 [p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3] (1 + K_{pf} \Delta f)$$

$$Q = Q_0 [q_1 \bar{V}^2 + q_2 \bar{V} + q_3] (1 + K_{qf} \Delta f)$$

$$\begin{aligned} \Delta f &= f - f_0 \\ 0 &< K_{pf} < 3 \\ -2 &< K_{qf} < 0 \end{aligned}$$

Modelado de cargas dinámicas

- Relés de protección térmicos y de sobrecorriente.
- Cargas térmicas (calentadores de agua, refrigeradores)
- Dispositivos con delays o controles en el tiempo



Modelado de cargas dinámicas

La potencia demandada por la carga es:

$$P = z_P P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_t}$$

$$Q = z_Q Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_t}$$

Donde z_P y z_Q son variables adimensionales asociadas a la carga dinámica y se rigen por:

$$T_P \dot{z}_P = \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} - z_P \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_t}$$

α_s exponente de P en rég. permanente

α_t exponente de P en rég. transitorio

$$T_Q \dot{z}_Q = \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} - z_Q \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_t}$$

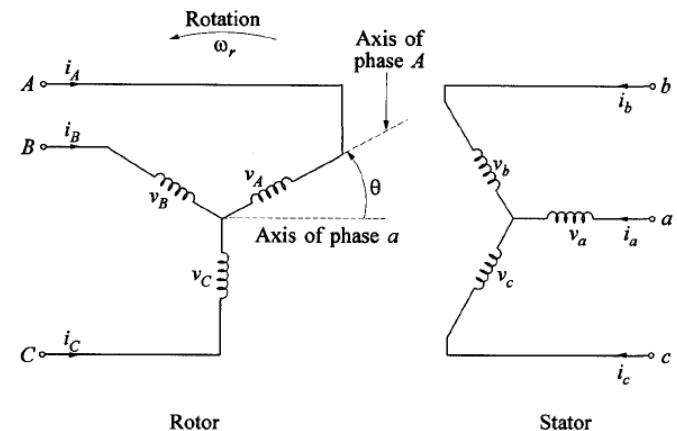
β_s exponente de Q en rég. permanente

β_t exponente de Q en rég. transitorio

Motor de inducción trifásico

<https://la.mathworks.com/help/mcb/ref/inductionmotor.html>

Se usa corrientes positivas cuando entran a los devanados. Aquí se usan minúsculas para el estator y mayúsculas para el rotor.



- 3 ecuaciones para los devanados del estator

$$v_a = R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad v_b = R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad v_c = R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt}$$

- 3 ecuaciones para los devanados del rotor

$$0 = R_r i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \quad 0 = R_r i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \quad 0 = R_r i_C + \frac{d\psi_C}{dt}$$

R_s y R_r son las resistencias por fase de devanado de estator y rotor.

Transformada de Park (Truco: multiplicar por $e^{j\theta}$)

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt}$$

$$v_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\psi_{os}}{dt}$$

Estator

$$0 = R_r i_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt}$$

$$0 = R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt}$$

$$0 = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt}$$

Rotor

Transformando los flujos encadenados

$$\psi_a = L_{aa}i_a + L_{ab}(i_b + i_c) + L_{aA}[i_A \cos\theta + i_B \cos(\theta + 120^\circ) + i_C \cos(\theta - 120^\circ)]$$

$$\psi_A = L_{AA}i_A + L_{AB}(i_B + i_C) + L_{aA}[i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)]$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{os} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \\ \psi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & & & L_{sr} & & \\ & L_{ss} & & & L_{sr} & \\ & & L_{os} & & & \\ L_{sr} & & & L_{rr} & & \\ & L_{sr} & & & L_{rr} & \\ & & & & & L_{or} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix}$$

R_s	0.01 - 0.12 pu	R_r	0.01 - 0.13 pu
$L_{ss} - L_{sr}$	0.07 - 0.15 pu	$L_{rr} - L_{sr}$	0.06 - 0.18 pu
L_{sr}	1.8 - 3.8 pu		

L_{ls} Inductancia de dispersión del estator

$L_{sr} = L_m$ Inductancia mutua (o de magnetización)

L_{lr} Inductancia de dispersión del rotor

Balance de potencias en estator

La potencia activa que entra al motor es:

$$\begin{aligned} p_T(t) &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{os} i_{os} \\ &= (R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2 + R_s i_{os}^2) + \underbrace{\left(i_{ds} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + i_{os} \frac{d\psi_{os}}{dt} \right)}_{\frac{d}{dt} \text{ de energía magnética almacenada en estator.}} \\ &\quad + \underbrace{\omega_s (\psi_{qs} i_{ds} - \psi_{ds} i_{qs})}_{p_{s \rightarrow r} = \omega_s T_e} \end{aligned}$$

$$T_e = \psi_{qs} i_{ds} - \psi_{ds} i_{qs} = \psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr} = L_{sr} (i_{qr} i_{ds} - i_{dr} i_{qs}).$$

Movimiento del rotor

La dinámica electromecánica para el eje se representa por la **ecuación de oscilación**:

$$2H \frac{d}{dt} \omega_r = T_e - T_m$$

H es la constante de inercia, en s.

 Par de carga

ω_r , T_e y T_m en p.u.

El par mecánico (de carga) varía con la velocidad:

$$T_m = T_{mo} (A\omega_r^2 + B\omega_r + C) \quad \text{donde} \quad A + B + C = 1$$

T_{mo} es el par cuando $\omega_r = 1$

Modelo de 3er orden

Para estabilidad no consideramos la dinámica rápida de fenómenos electromagnéticos en estator.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \omega_s \psi_{qs} + \cancel{\frac{d\psi_{ds}^0}{dt}} \quad v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} + \cancel{\frac{d\psi_{qs}^0}{dt}}$$

Las otras ecuaciones se mantienen igual:

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \quad \frac{d\psi_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr}$$

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \quad \psi_{dr} = L_{sr} i_{ds} + L_{rr} i_{dr}$$

$$\psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \quad \psi_{qr} = L_{sr} i_{qs} + L_{rr} i_{qr}$$

$$2H \frac{d}{dt} \omega_r = \psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr} - T_{mo} (A \omega_r^2 + B \omega_r + C)$$

Parámetros típicos de motores para modelo de par mecánico

	A	B	C	H (s)
Bomba de calor, aire acondicionado	0.2	0	0.8	0.28
Refrigerador, congelador	0.2	0	0.8	0.28
Lavadora de platos	1	0	0	0.28
Lavadora de ropa	1	0	0	1.5
Secadora de ropa	1	0	0	1.3
Bombas, ventiladores y otros motores	1	0	0	0.7
Motor industrial pequeño	1	0	0	0.7
Motor industrial grande	1	0	0	1.5
Auxiliares de plantas de energía	1	0	0	1.5
Bomba de agua para agricultura	1	0	0	0.4

Parámetros típicos de motores

Component	Static characteristics											Dynamic Characteristics								
	PF	P_v	P_f	Q_v	Q_f	N_{sc}	PF_{min}	$P_{v_{min}}$	$P_{f_{min}}$	$Q_{v_{min}}$	$Q_{f_{min}}$	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	A	B	H	LF_m
Resistance space heater	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Heat pump space heating	0.84	0.2	0.9	2.5	-1.3	0.9	1.0	2.0	0	0	0	.33	.076	2.4	.048	.062	0.2	0	0.28	0.6
Heat pump central air cond.	0.81	0.2	0.9	2.5	-2.7	1.0	-	-	-	-	-	.33	.076	2.4	.048	.062	0.2	0	0.28	0.6
Central air conditioner	0.81	0.2	0.9	2.2	-2.7	1.0	-	-	-	-	-	.33	.076	2.4	.048	.062	0.2	0	0.28	0.6
Room air conditioner	0.75	0.5	0.6	2.5	-2.8	1.0	-	-	-	-	-	.10	.10	1.8	.09	.06	0.2	0	0.28	0.6
Water heater	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Range	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Refrigerator and freezer	0.84	0.8	0.5	2.5	-1.4	0.8	1.0	2.0	0	0	0	.056	.087	2.4	.053	.082	0.2	0	0.28	0.5
Dishwasher	0.99	1.8	0.0	3.5	-1.4	0.8	1.0	2.0	0	0	0	.11	.14	2.8	.11	.065	1.0	0	0.28	0.5
Clothes washer	0.65	0.08	2.9	1.6	1.8	1.0	-	-	-	-	-	.11	.12	2.0	.11	.13	1.0	0	0.69	0.4
Incandescent lighting	1.0	1.54	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clothes dryer	0.99	2.0	0.0	3.3	-2.6	0.2	1.0	2.0	0	0	0	.12	.15	1.9	.13	.14	1.0	0	0.11	0.4
Colored television	0.77	2.0	0.0	5.2	-4.6	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Furnace fan	0.73	0.08	2.9	1.6	1.8	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Commercial heat pump	0.84	0.1	1.0	2.5	-1.3	0.9	1.0	2.0	0	0	0	.53	.83	1.9	.036	.068	0.2	0	0.28	0.6
Heat pump commercial A/C	0.81	0.1	1.0	2.5	-1.3	1.0	-	-	-	-	-	.53	.83	1.9	.036	.068	0.2	0	0.28	0.6
Commercial central A/C	0.75	0.1	1.0	2.5	-1.3	1.0	-	-	-	-	-	.53	.83	1.9	.036	.068	0.2	0	0.28	0.6
Commercial room A/C	0.75	0.5	0.6	2.5	-2.8	1.0	-	-	-	-	-	.10	.10	1.8	.09	.06	0.2	0	0.28	0.6
Fluorescent lighting	0.90	1.0	1.0	3.0	-2.8	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pumps, fans, other motors	0.87	0.08	2.9	1.6	1.8	1.0	-	-	-	-	-	.079	.12	3.2	.052	.12	1.0	0	0.7	0.7
Electrolysis	0.90	1.8	-0.3	2.2	0.6	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arc furnace	0.72	2.3	-1.0	1.61	-1.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Small industrial motors	0.83	0.1	2.9	0.6	-1.8	1.0	-	-	-	-	-	.031	.10	3.2	.018	.18	1.0	0	0.7	0.6
Large industrial motors	0.89	0.05	1.9	0.5	1.2	1.0	-	-	-	-	-	.013	.067	3.8	.009	.17	1.0	0	1.5	0.8
Agricultural water pumps	0.85	1.4	5.6	1.4	4.2	1.0	-	-	-	-	-	.025	.088	3.2	.016	.17	1.0	0	0.8	0.7
Power plant auxiliaries	0.80	0.08	2.9	1.6	1.8	1.0	-	-	-	-	-	.013	.14	2.4	.009	.12	1.0	0	1.5	0.7

Fuente: Carson W. Taylor "Power System Voltage Stability", EPRI.

Software de Simulación

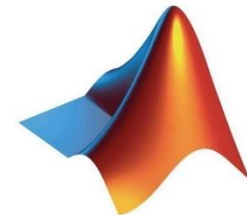
Matlab - Simulink

<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/pss-software/psse-xplore-order-form.html>

PSS/e - Python

<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/pss-software/psse-xplore-order-form.html>

<https://www.anaconda.com/distribution/>

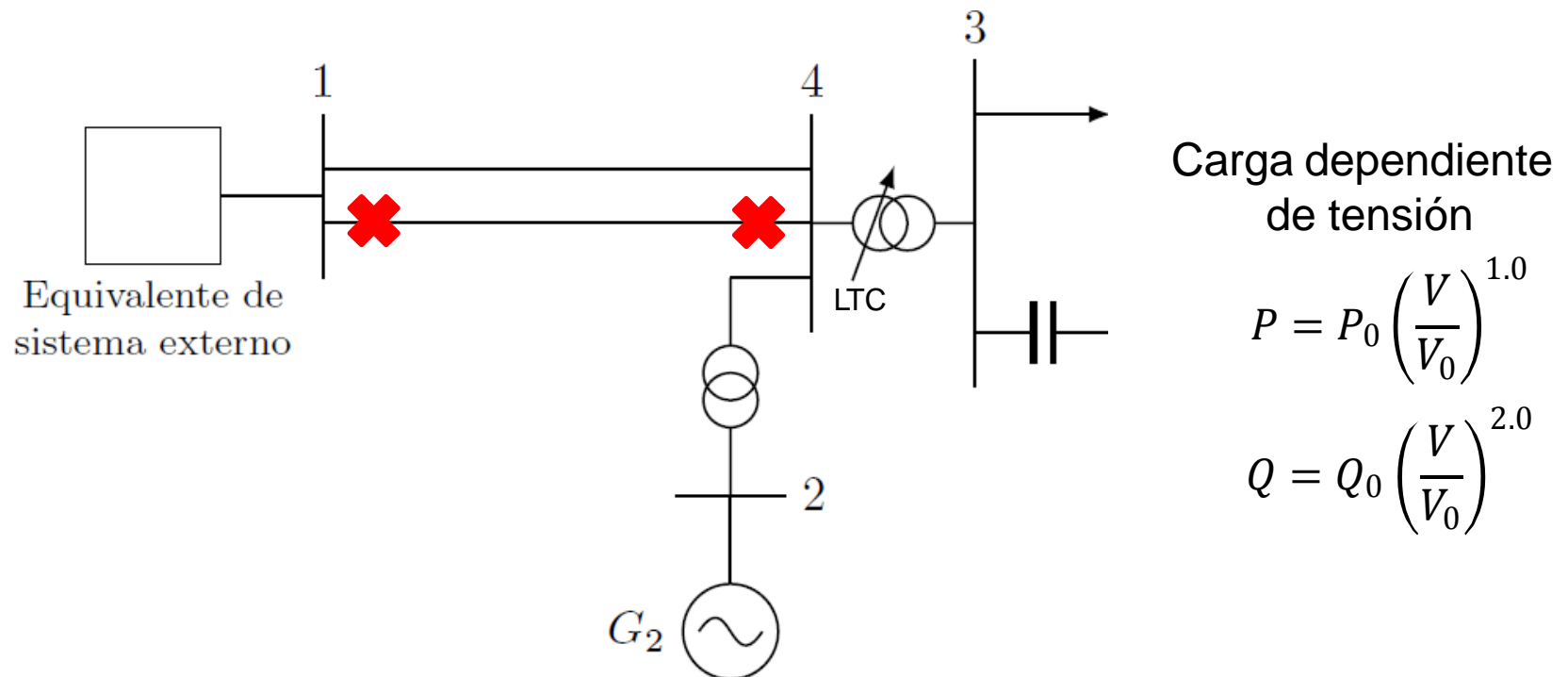


VS



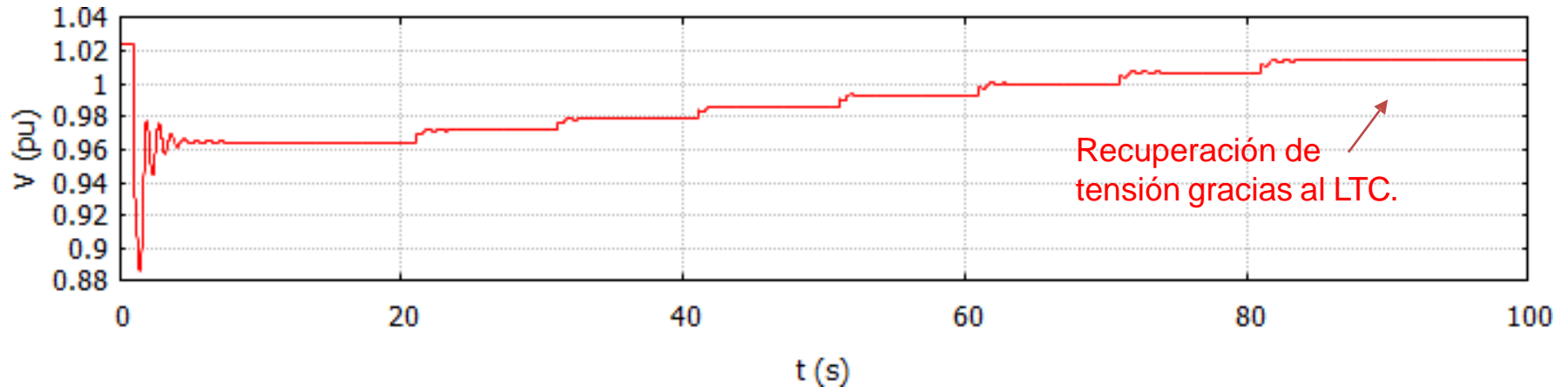
Simulación de cargas estáticas

Simulación de la salida de una línea de transmisión que conlleva a caída de tensión en carga exponencial

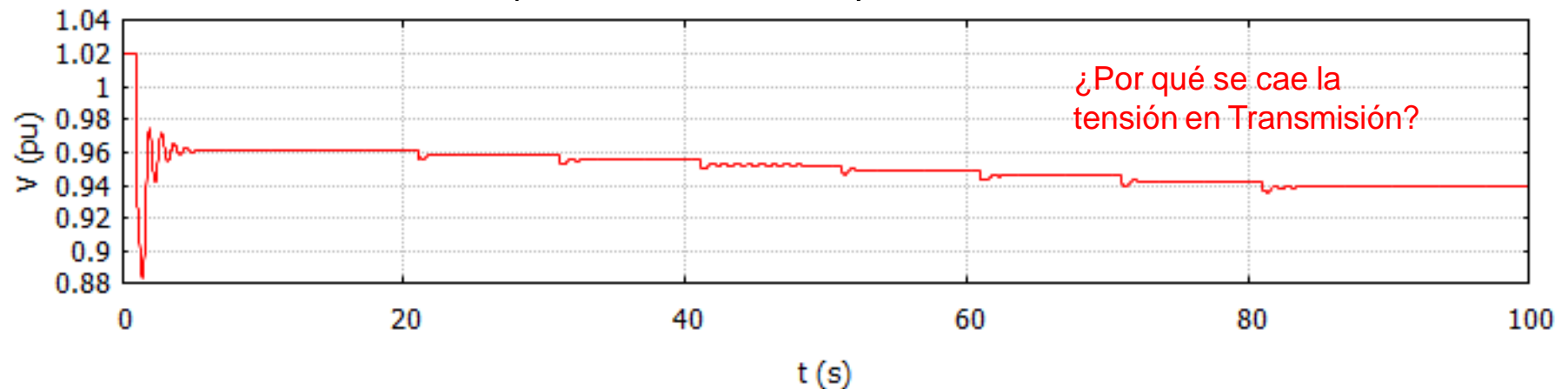


Simulación en RAMSES (o PSS/e)

Tensión en barra 3 (de distribución)

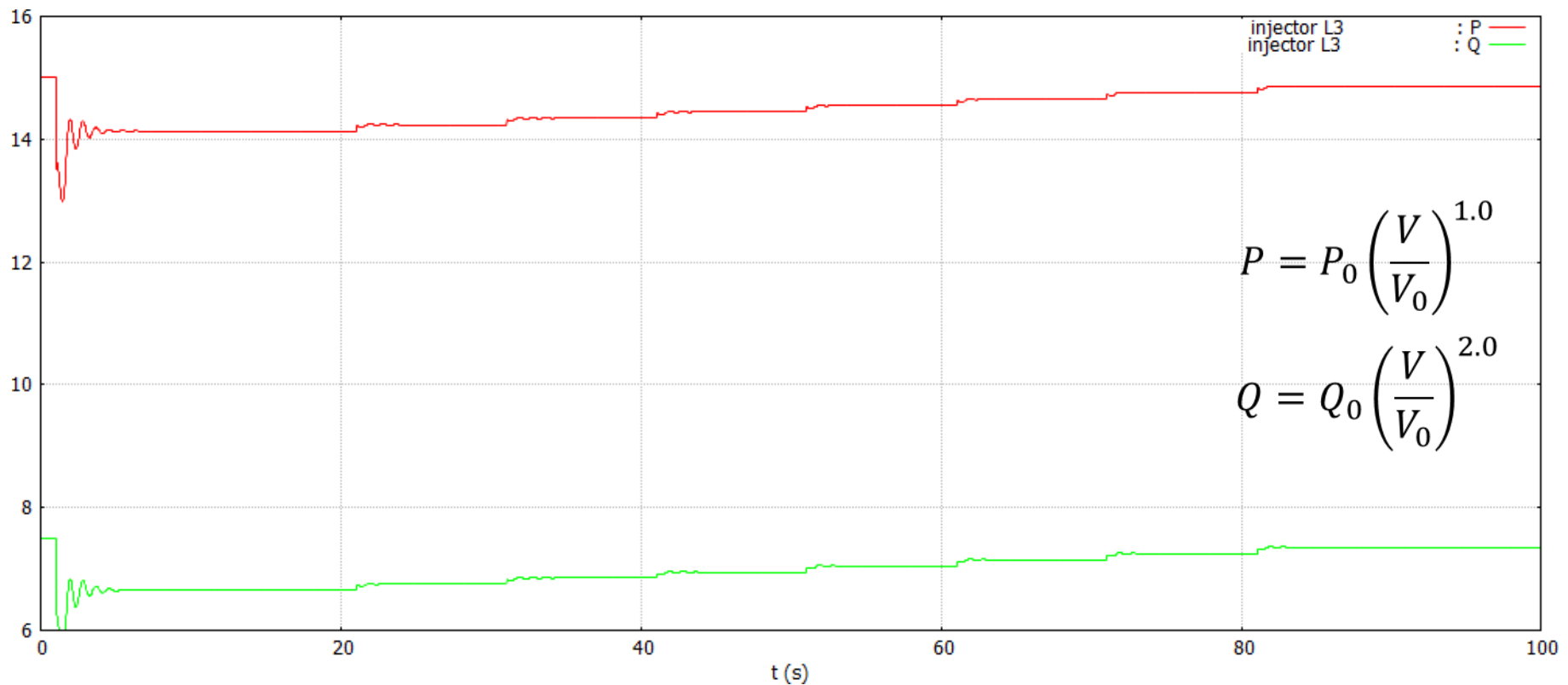


Tensión en barra 4 (de transmisión)



Simulación en RAMSES (o PSS/e)

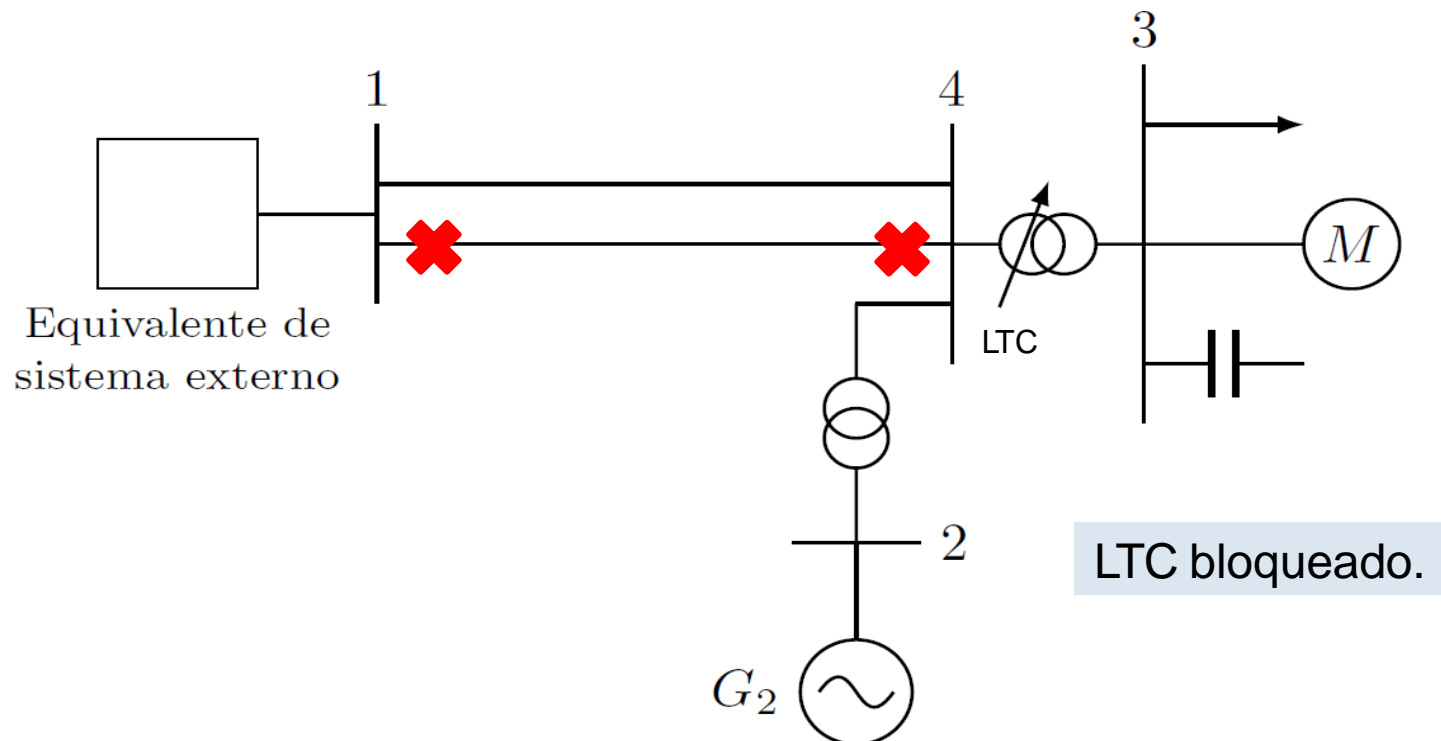
Potencia activa y reactiva demandada por la carga en barra 3



Simulación de motor de inducción

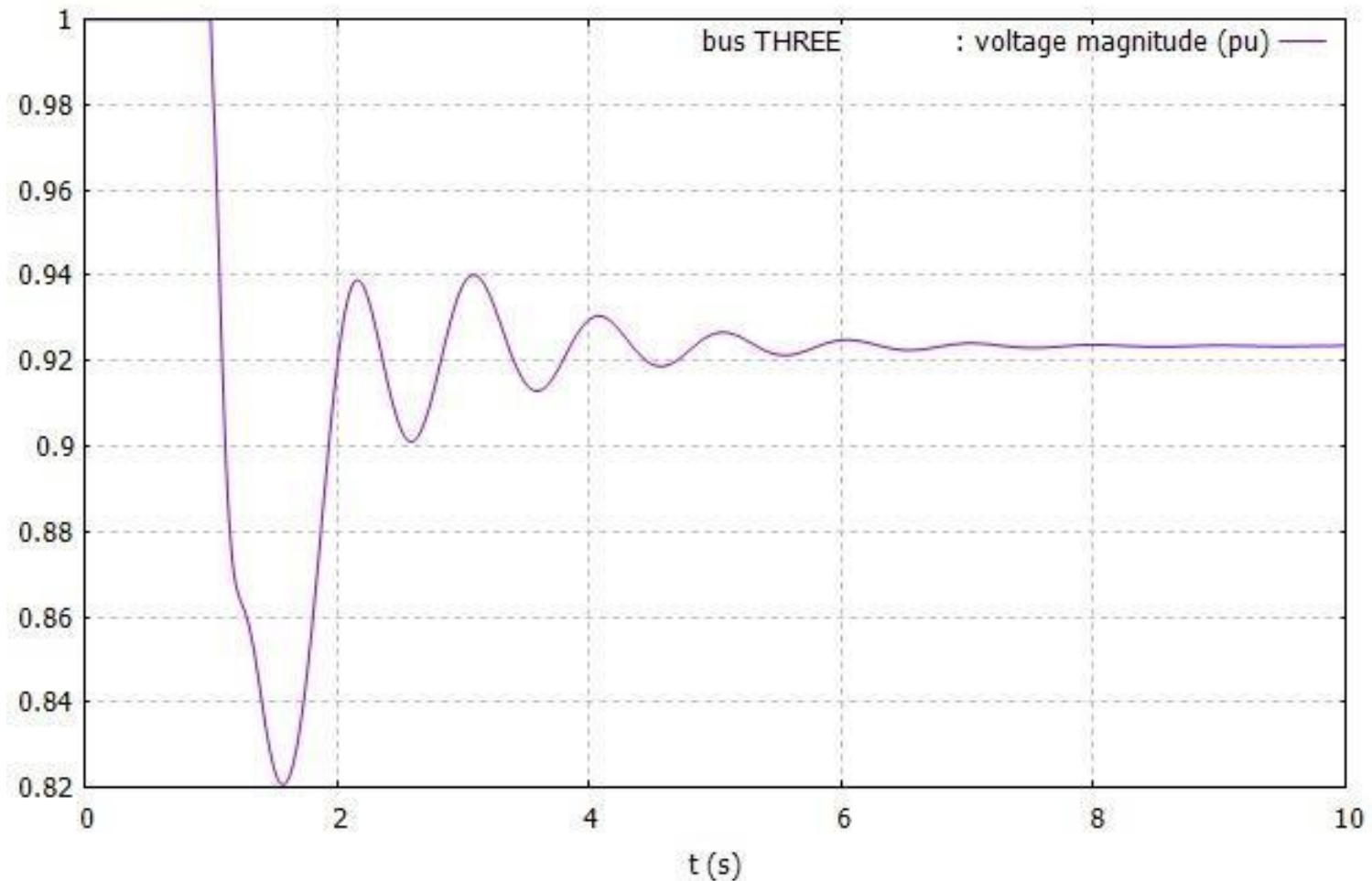
Simulación de la salida de una línea de transmisión que conlleva a caída de tensión en terminales del motor

$$X_s = 0.1 \quad X_r = 0.18 \quad X_m = 3.2 \text{ pu} \quad R_r = 0.018 \text{ pu} \quad H = 0.5 \text{ s}$$



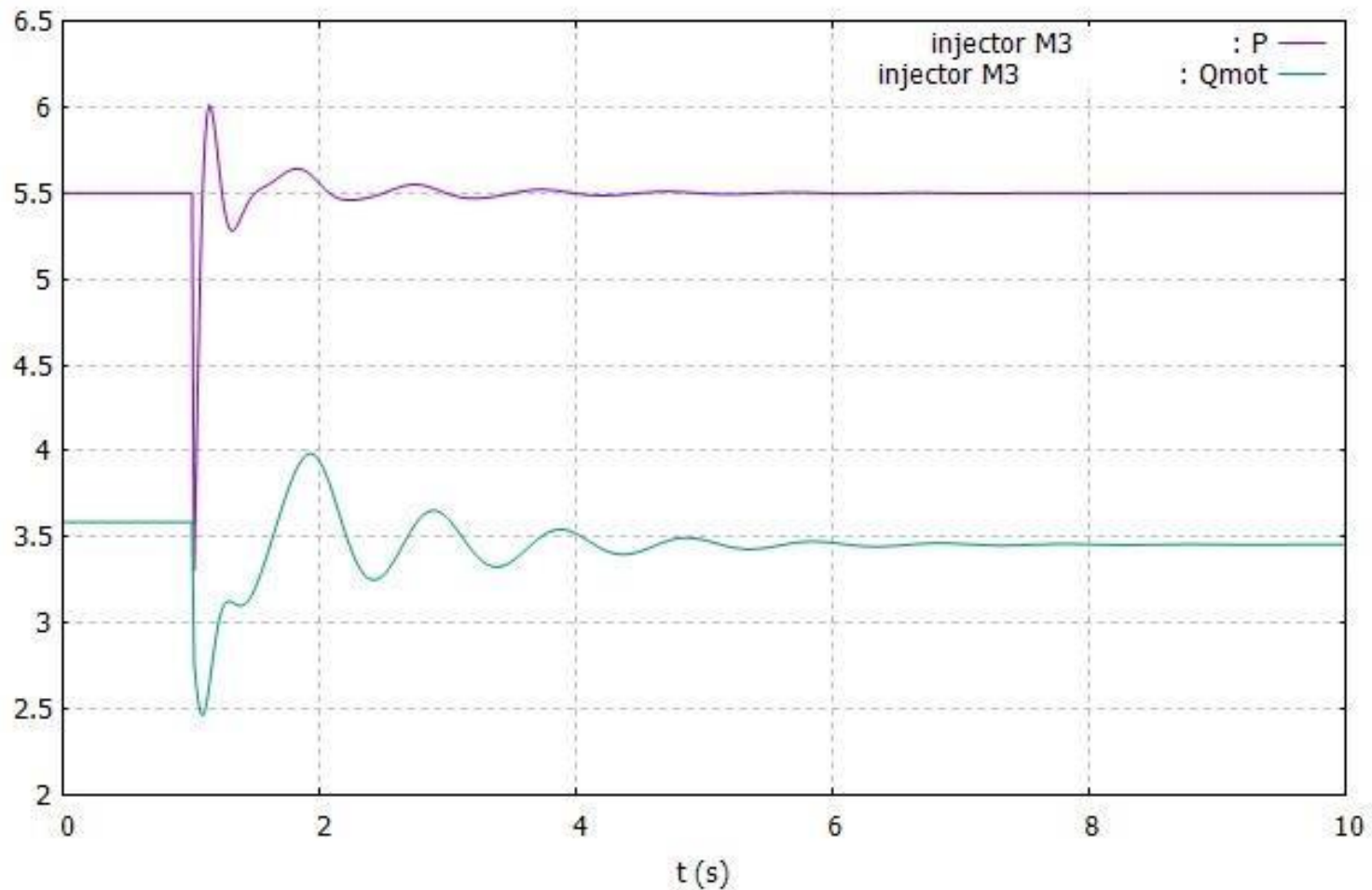
Simulación en RAMSES

Tensión en barra 3 (terminales del motor)



Simulación en RAMSES

Potencia activa y reactiva demandada por motor



Simulación en PSID



Comparación de tensiones en barras 3 para modelo de motor de 5to y 3er orden ante una perturbación en el sistema de 4 barras.

