



## **Encontro Internacional de Energia Eólica**

**3o. Painel – Tecnologia e Integração de Centrais Elétricas à Rede**

# **Modelagem de Aerogeradores em Estudos Elétricos**

**Natal, RN – 22 de Setembro de 2005**

**Nelson Martins  
Sérgio Gomes Jr.**

**Ricardo Diniz Rangel  
Júlio C. R. Ferraz**

# Modelos para Avaliação de Sistemas com Aerogeradores

## 1. Introdução

- ↪ Grupo de Trabalho de Geração Eólica (Grupo ELETROBRAS e ONS)

## 2. Programa de análise de transitórios eletromecânicos

- ↪ ANATEM – Considerações Gerais

## 3. Avaliação de aproveitamento eólico utilizando ANAREDE e ANATEM

- ↪ Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede
- ↪ Máquina de Indução com Dupla Alimentação
- ↪ Máquina Síncrona com Velocidade Variável

## 4. Considerações Finais

# 1. Introdução – Grupo de Trabalho de Geração Eólica

- Esforço de âmbito nacional
- Composto pelas empresas do Grupo ELETROBRAS e pelo ONS
  - ↳ CEPEL, ELETROBRAS, FURNAS, CHESF, ELETROSUL, ELETRONORTE, ONS
- Coordenação do CEPEL
  - ↳ Diversas reuniões de trabalho realizadas desde 2003
- Objetivo
  - ↳ Permitir a avaliação de sistemas que possuam aerogeradores
  - ↳ Definição dos modelos a serem prioritariamente implementados

# 1. Introdução – Grupo de Trabalho de Geração Eólica

- A partir da determinação das tecnologias mais utilizadas
  - ↳ Implementação de modelos nos programas ANAREDE e ANATEM
  - ↳ Programas de uso corrente em estudos de planejamento e operação pelas empresas do setor elétrico brasileiro
- Modelos disponíveis são bastante gerais
  - ↳ São capazes de reproduzir o comportamento de diversos equipamentos mediante ajustes inerentes a cada fabricante
- Avaliação dos modelos utilizando sistemas teste
  - ↳ Análise do sistema na ocorrência de distúrbios no vento (potência mecânica) e na rede

## 2. Programa ANATEM

→ Possui dois tipos de modelos

↳ Pré-definido (“*built-in*”)

↳ Controlador Definido pelo Usuário (CDU)

→ Modelo Pré-definido (“*built-in*”)

↳ Modelos não flexíveis

↳ As equações que modelam o equipamento são conhecidas

▶ Possuem estrutura fixa

▶ Modelos bem estabelecidos na literatura

▶ As equações são descritas no manual

↳ O usuário apenas altera os valores dos parâmetros

▶ Ex.: modelo de máquina síncrona, modelo IEEE de RT, etc.

## 2. Programa ANATEM

### → Controlador Definido pelo Usuário (CDU)

↳ Criado através de uma linguagem própria do tipo *script*

↳ Intrinsecamente flexível

### → Composto por uma série de blocos elementares

↳ Funções de transferência

↳ Funções lineares e não-lineares

↳ Operadores lógicos e chaves

### → Utilizando os blocos básicos, o usuário pode construir o seu próprio controlador

### → Ex.: RT, RV, PSS, FACTS, turbina eólica, controle de conversores, etc.

### 3. Avaliação de Aproveitamento Eólico

#### → Turbina eólica

- ↪ Controle por “*stall*”

- ↪ Controle do ângulo de posição da pá (“*pitch control*”)

#### → Três tecnologias básicas para o gerador

- ↪ Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

- ↪ Máquina de Indução com Dupla Alimentação

- ↪ Máquina Síncrona com Velocidade Variável

## 3.1. Potência Mecânica Fornecida pela Turbina Eólica

→ Potência mecânica é função de:

↪ Densidade do ar ( $\rho$ )

↪ Área varrida pelo rotor ( $A$ )

↪ Velocidade do vento ( $v$ )

↪ Curvas de desempenho da turbina  $C_p(\lambda, \beta)$

↪ Velocidade da turbina ( $\omega$ )

→ Considerações:

↪ Caixa de engrenagens

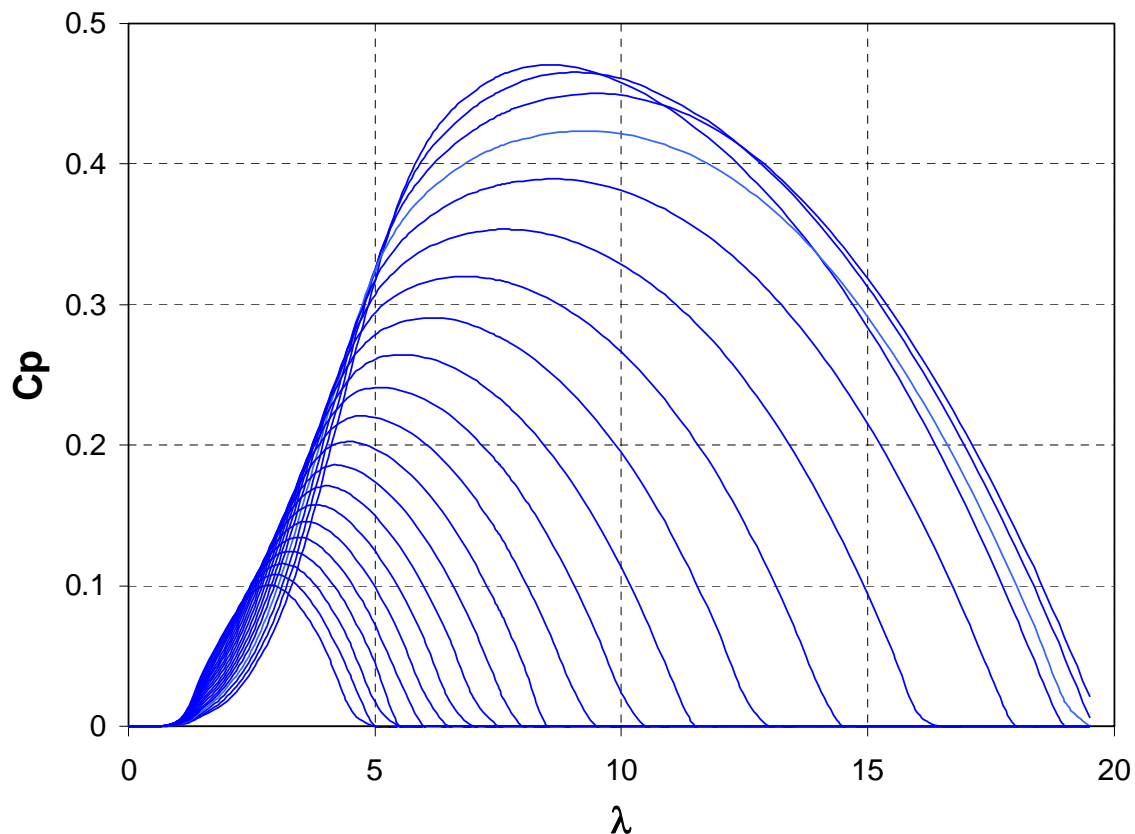
↪ Controle do ângulo de posição da pá (controle de "pitch")



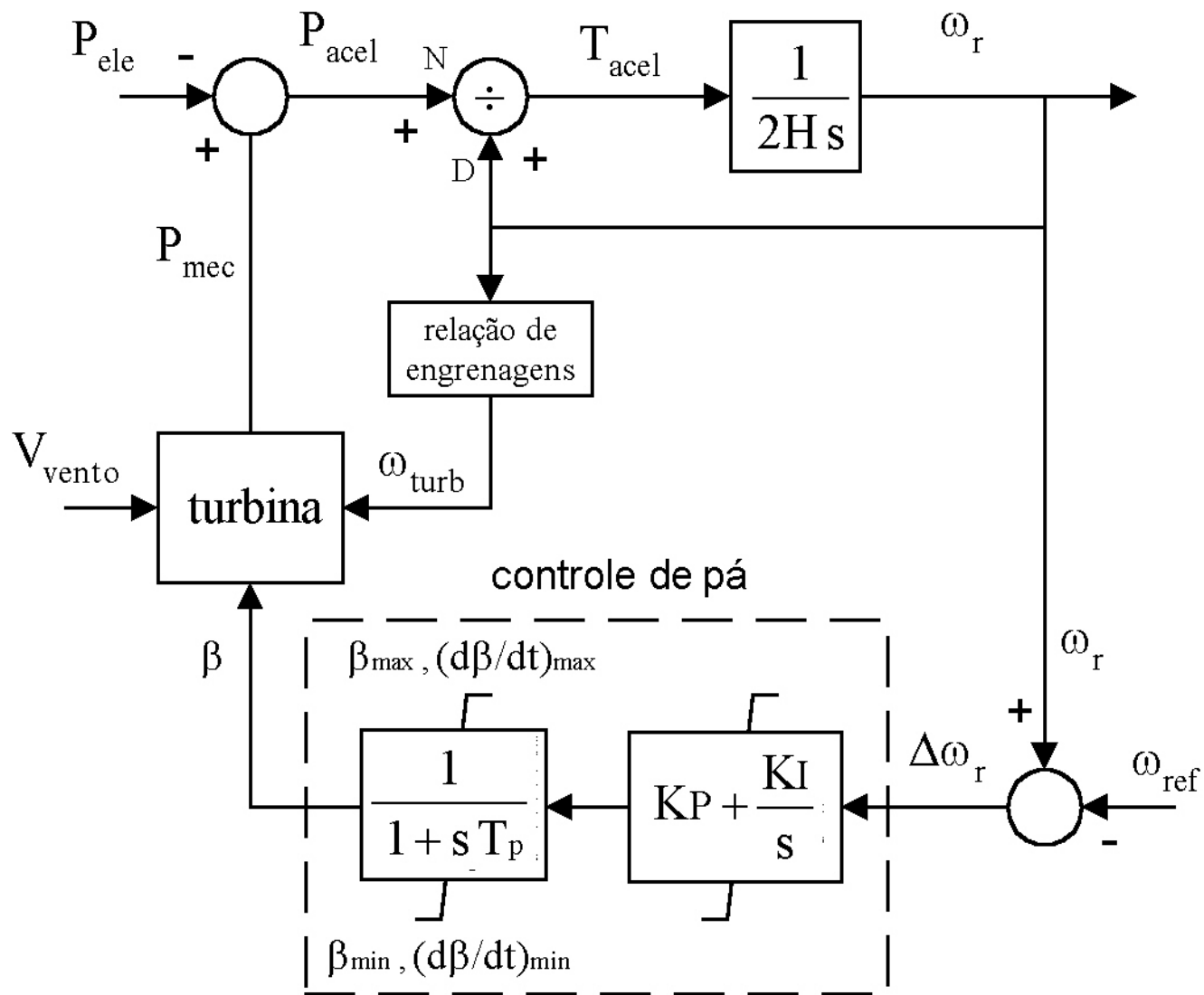
## 3.1. Potência Mecânica Fornecida pela Turbina Eólica

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) ; \quad \lambda = \omega \cdot R / v$$

$C_p \times \lambda \times \beta$



# 3.1. Equação Eletromecânica e Controle de Posição da Pá



## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

→ Máquina conectada a uma barra infinita

↳ Reatância  $X=20\%$  na base da máquina

→ Distúrbios

↳ Variação na velocidade do vento

▶ 1s: degrau de +1 m/s

▶ 5s: degrau de -1 m/s

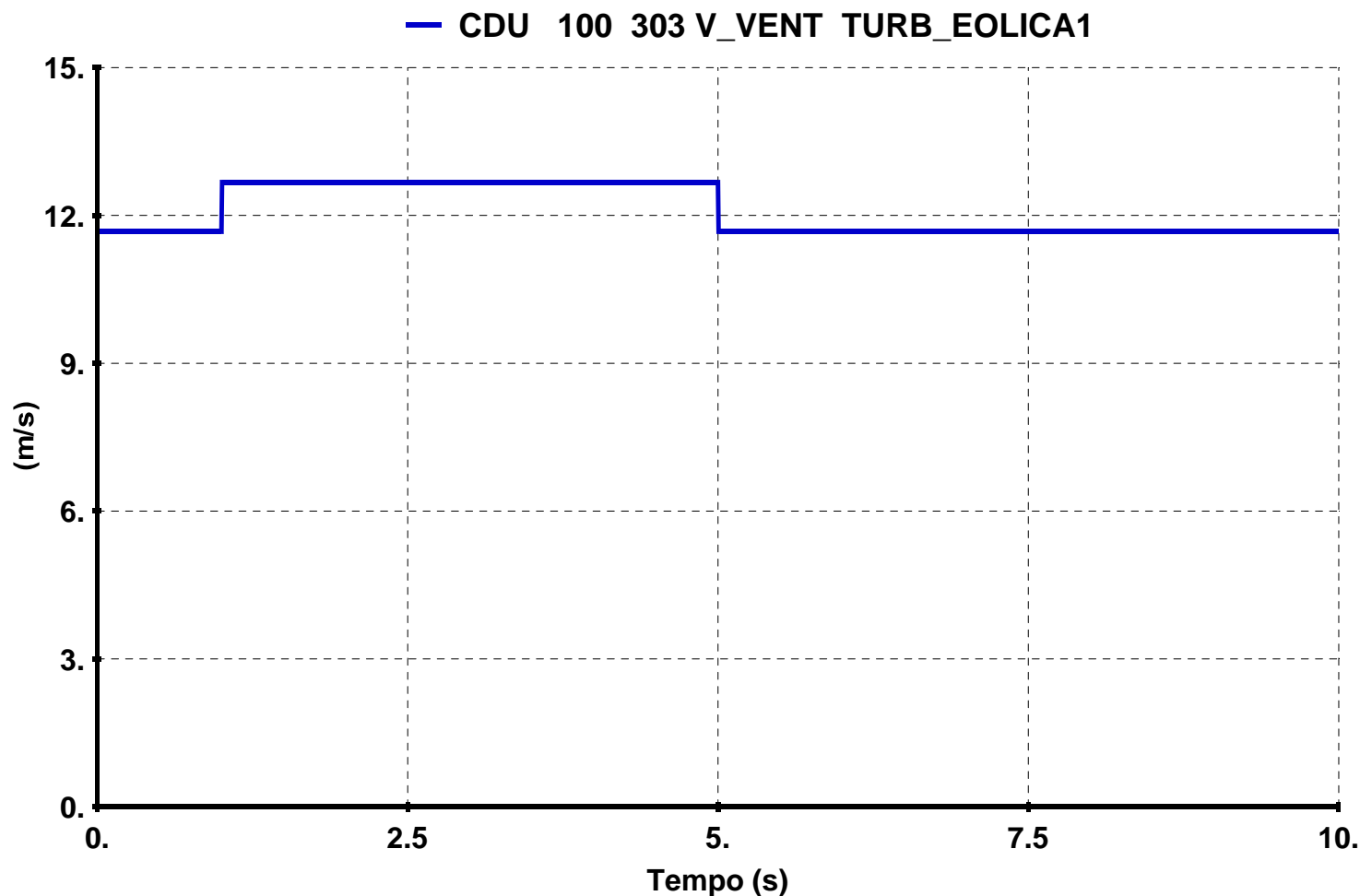
↳ Curto circuito trifásico na barra terminal

▶ Aplicado no instante  $t=1s$

▶ Duração de 100 ms

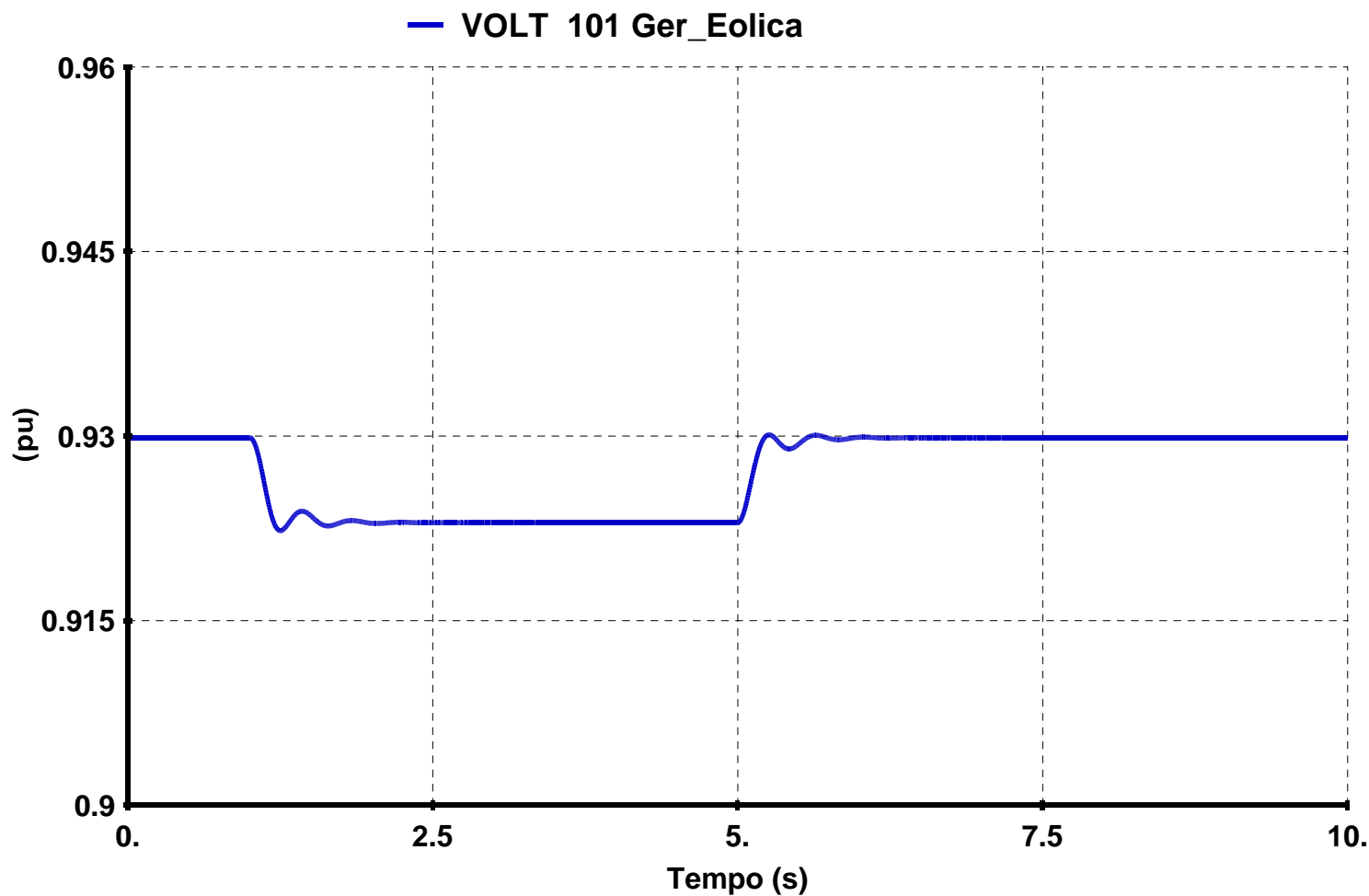
## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

→ Velocidade do vento



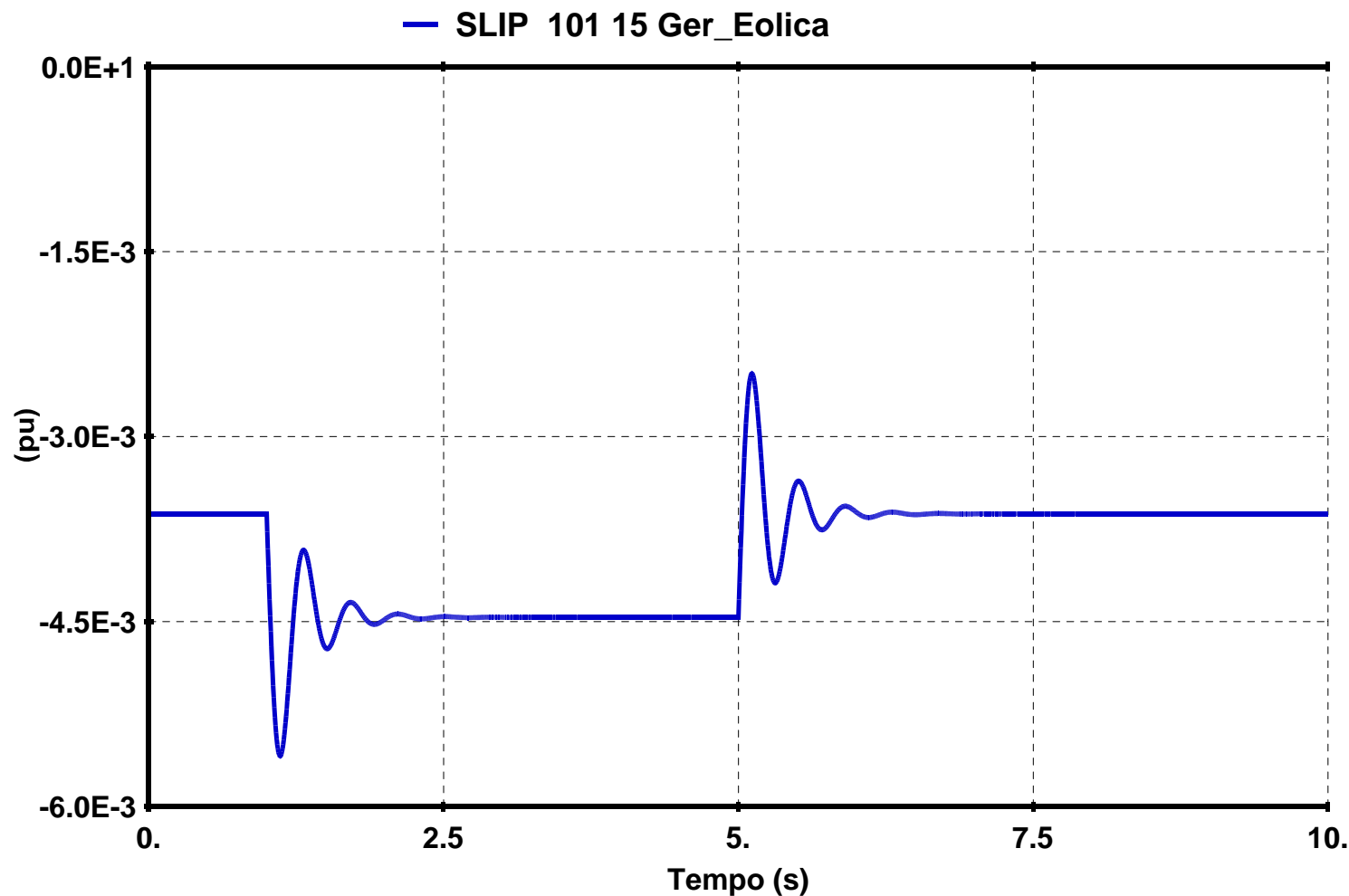
## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

→ Tensão na barra terminal do parque eólico



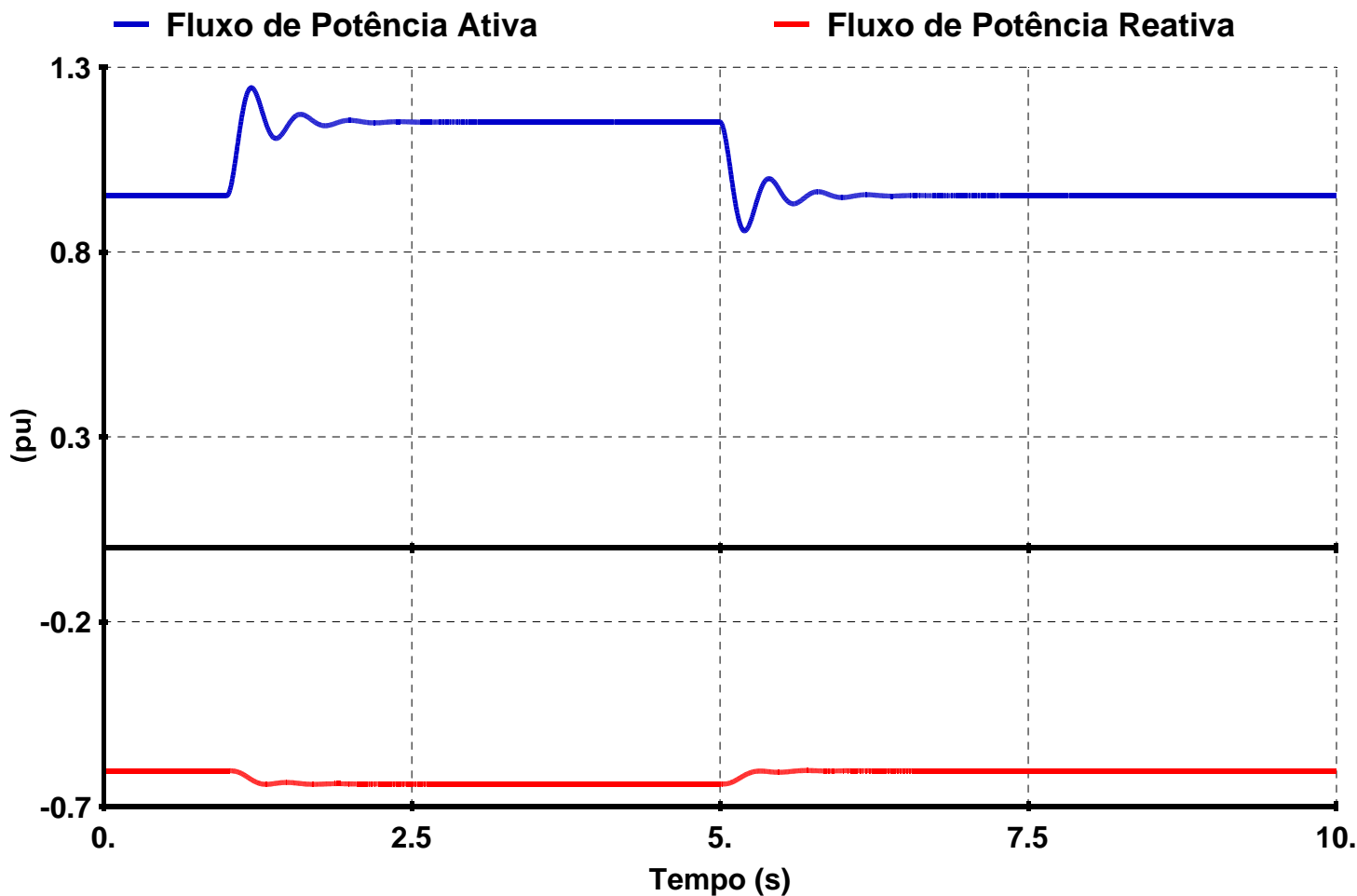
## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

→ Escorregamento



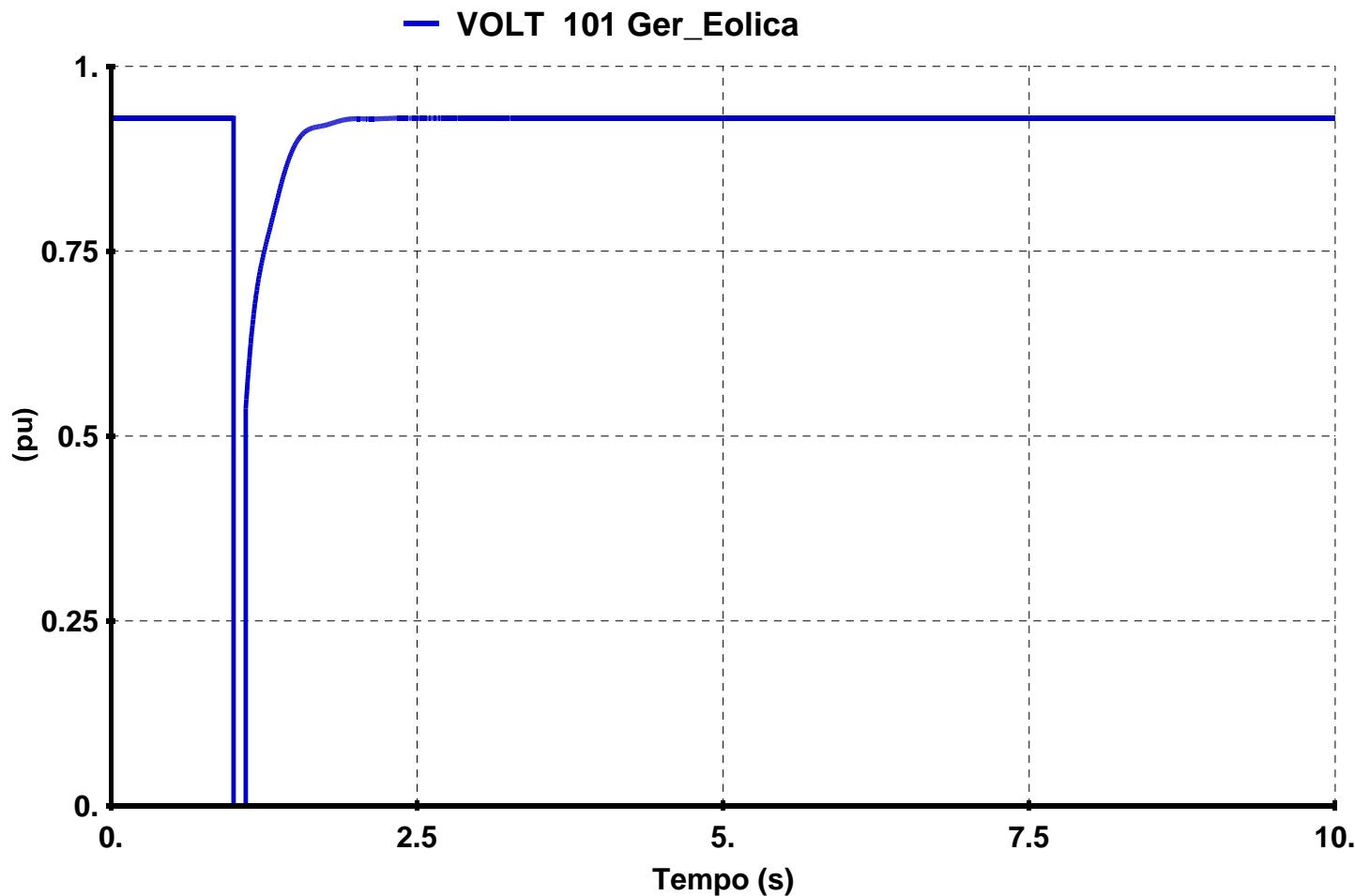
## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

→ Potência ativa e reativa na barra terminal do parque eólico



## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

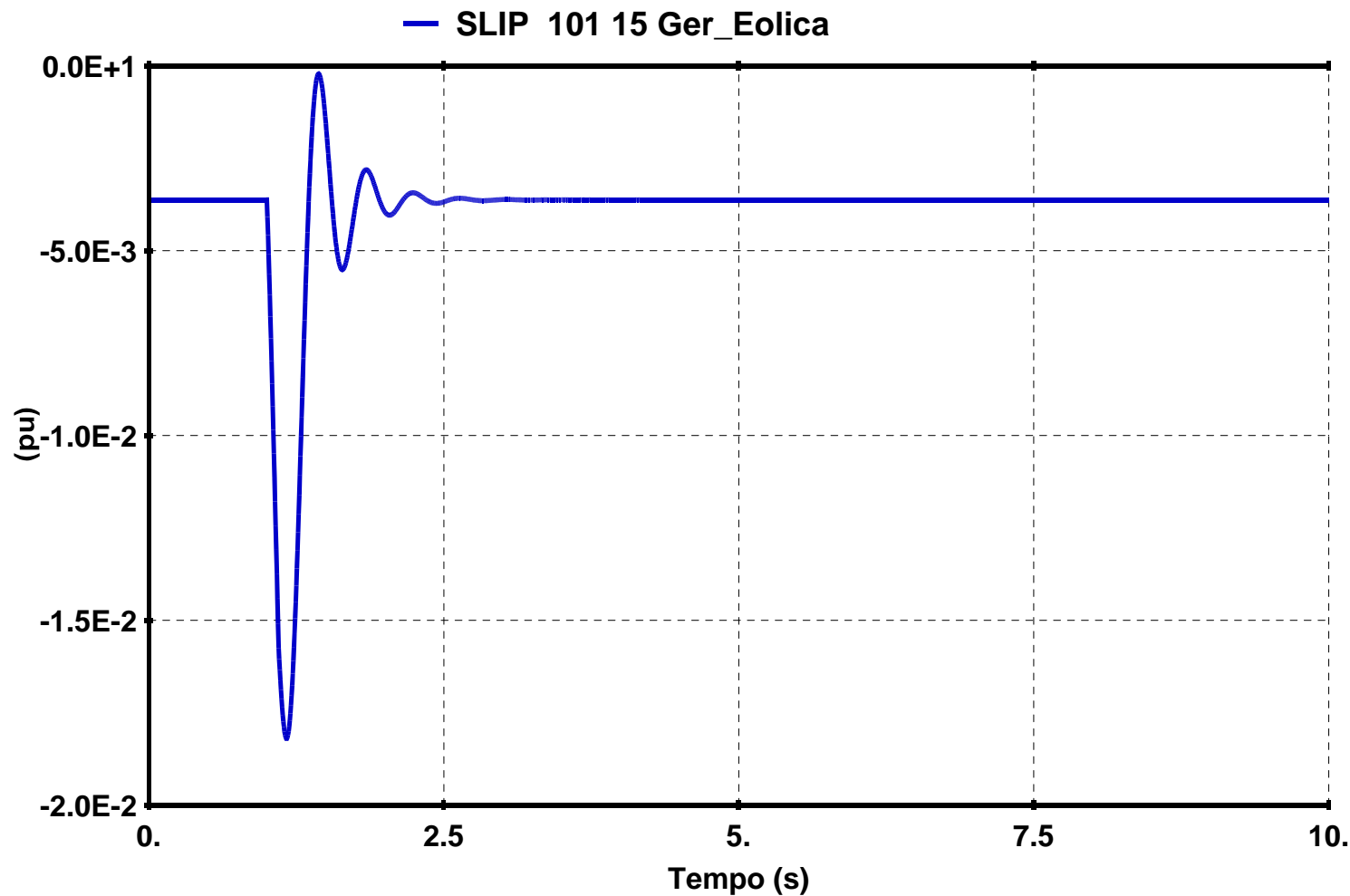
→ Tensão na barra terminal do parque eólico





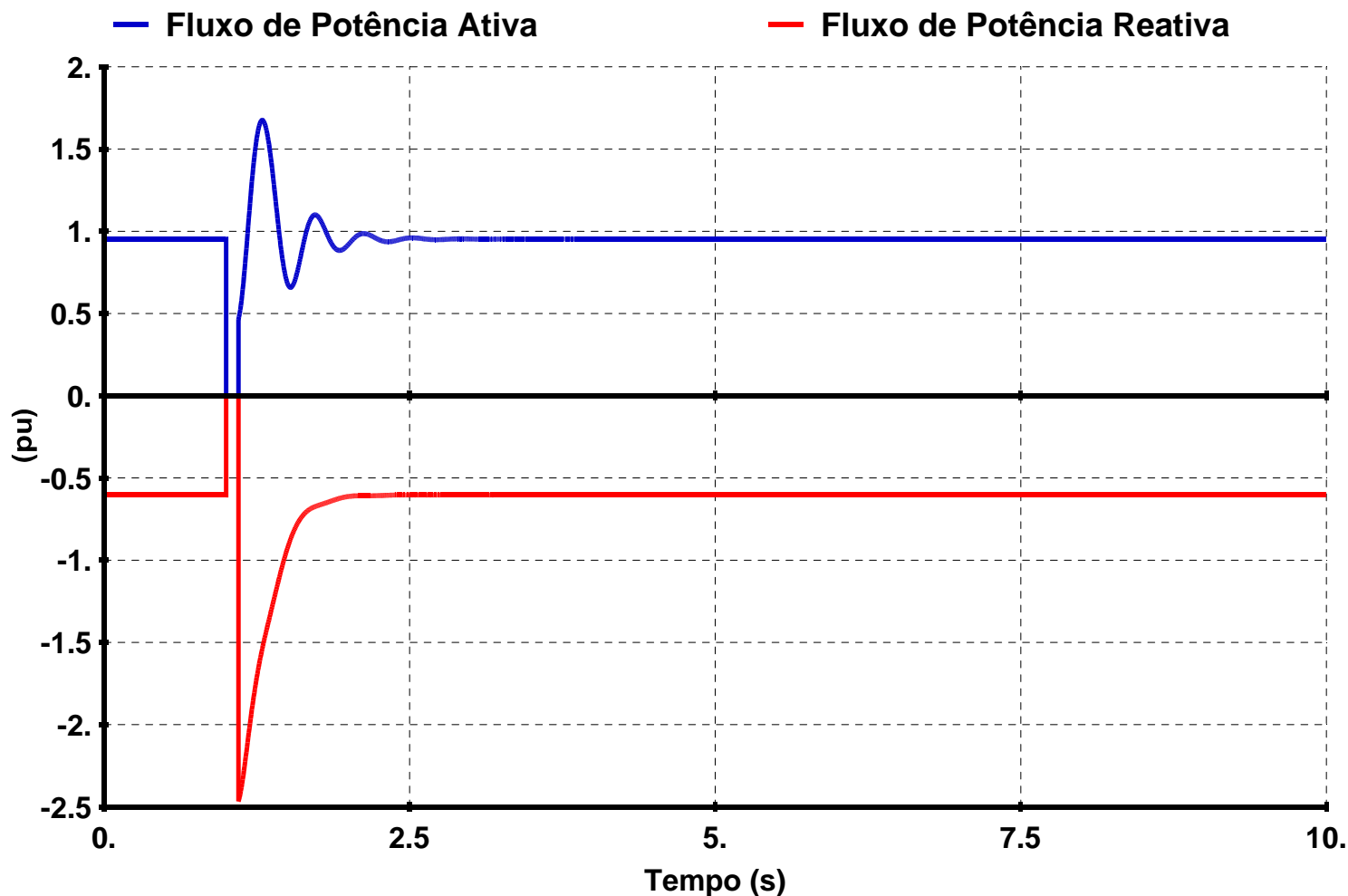
## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

→ Escorregamento

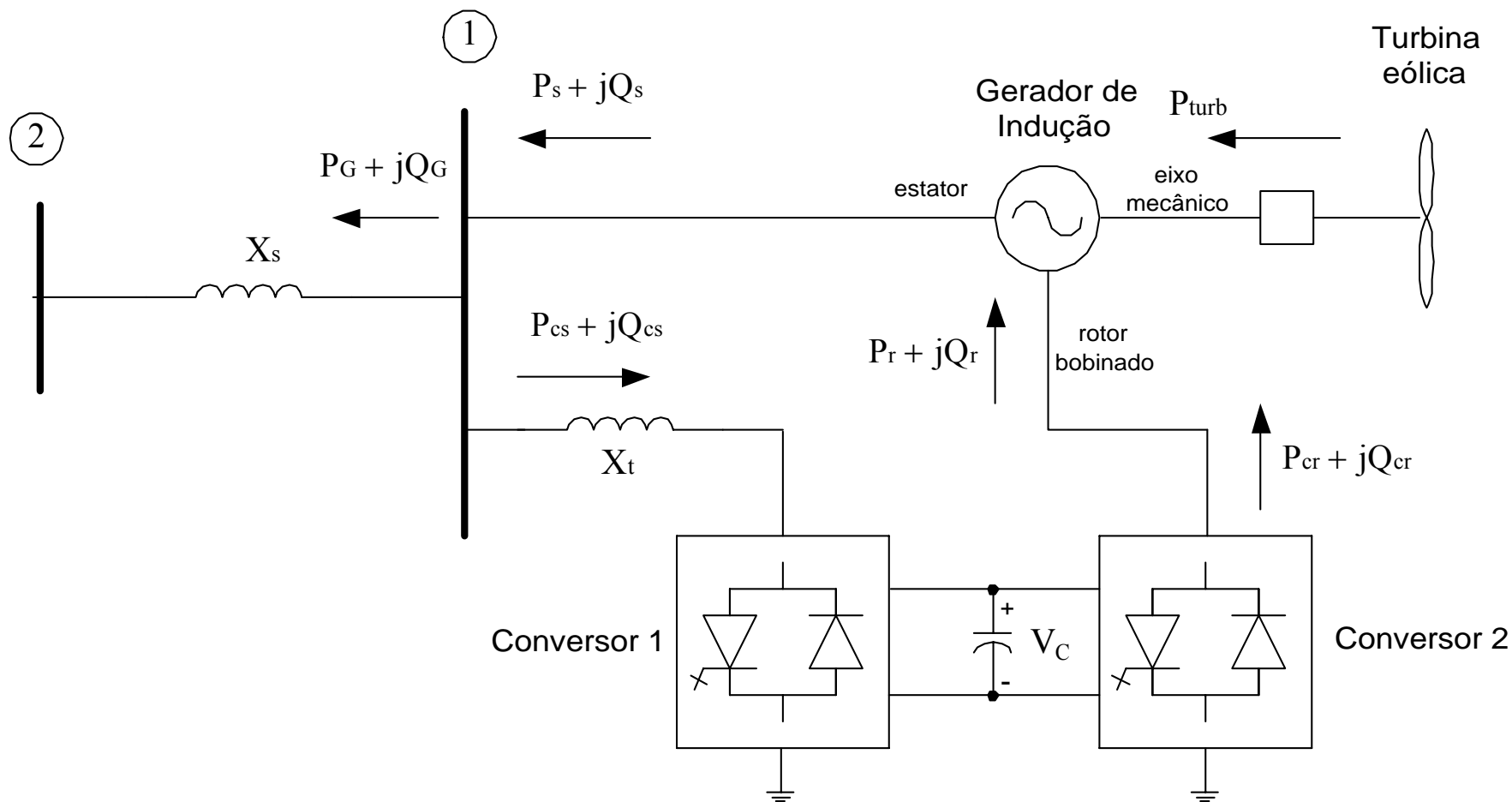


## 3.2. Máquina de Indução Diretamente Conectada à Rede

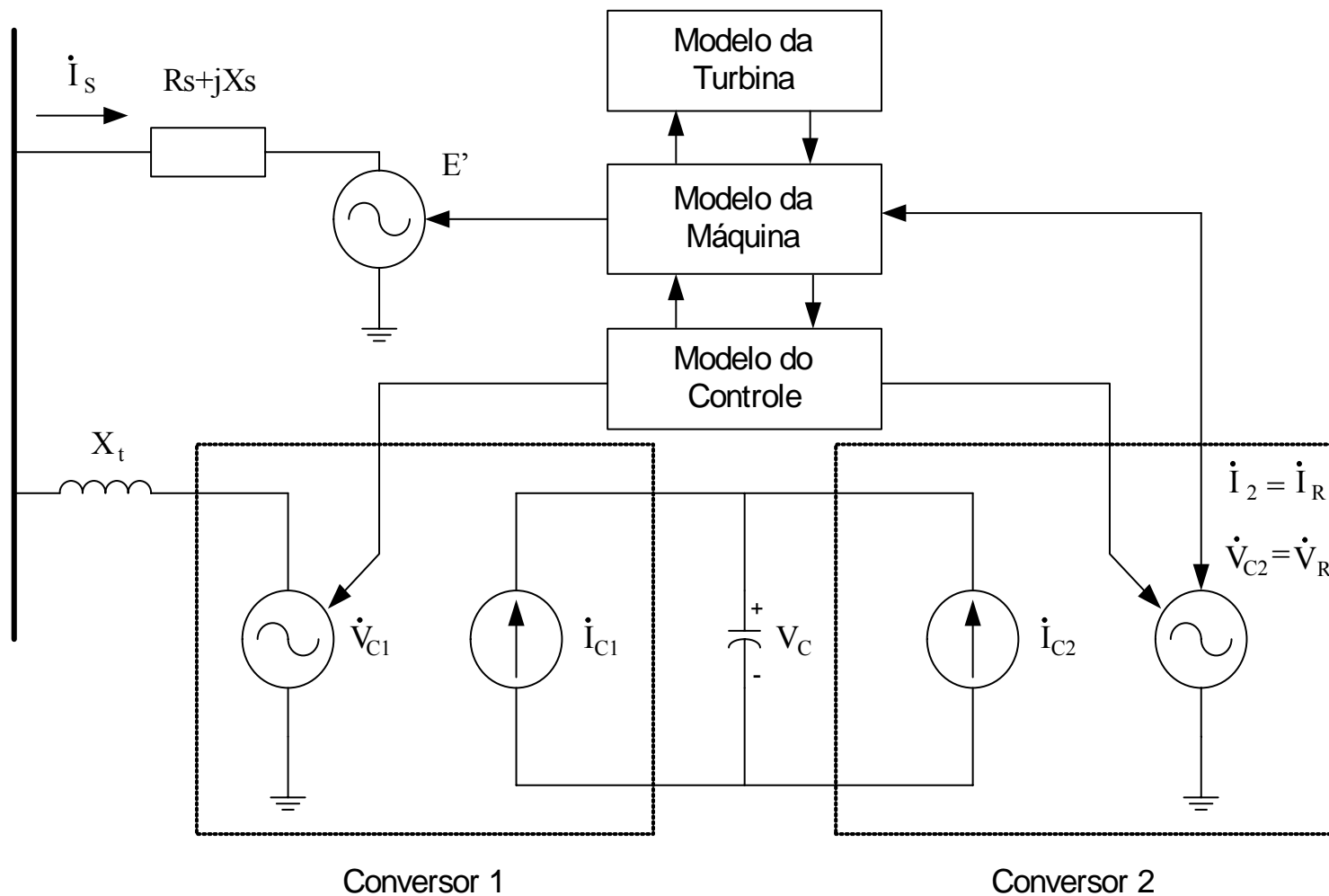
→ Potência ativa e reativa na barra terminal do parque eólico



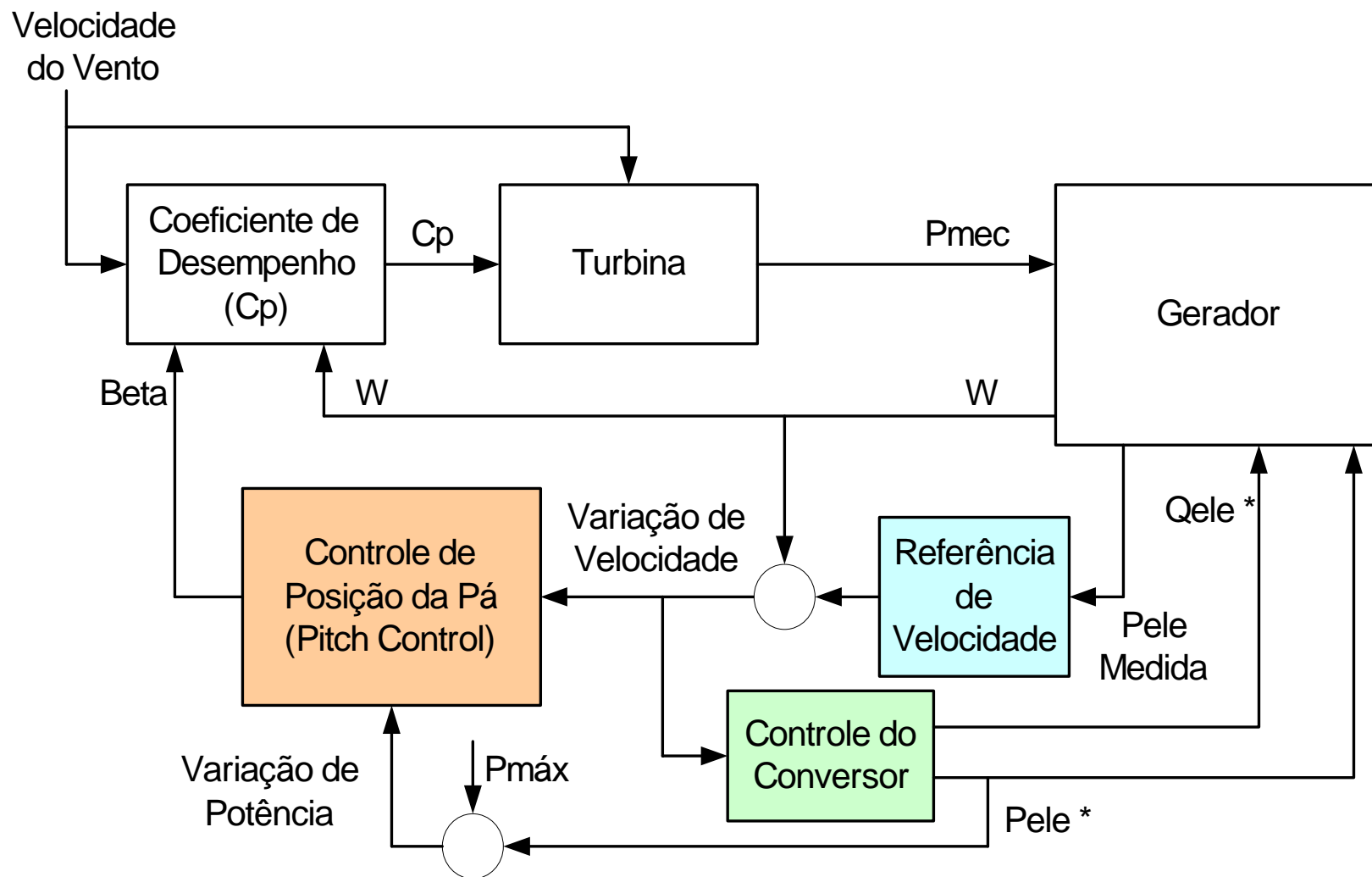
### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação



### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação



### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação



## 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

### → Conversor 1 (conectado ao estator)

#### ↪ Potência Ativa

- ▶ Controle da tensão no capacitor

#### ↪ Potência Reativa

- ▶ Controle do fator de potência no conversor

### → Conversor 2 (conectado ao rotor)

#### ↪ Potência Ativa

- ▶ Controle da velocidade “ótima” (escorregamento) da máquina

#### ↪ Potência Reativa

- ▶ Controle da geração de potência reativa
  - **Q** constante, **V** constante ou **f.p.** constante

## 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

### → Distúrbios

↪ Variação na velocidade do vento

▶ 1s: degrau de +1 m/s

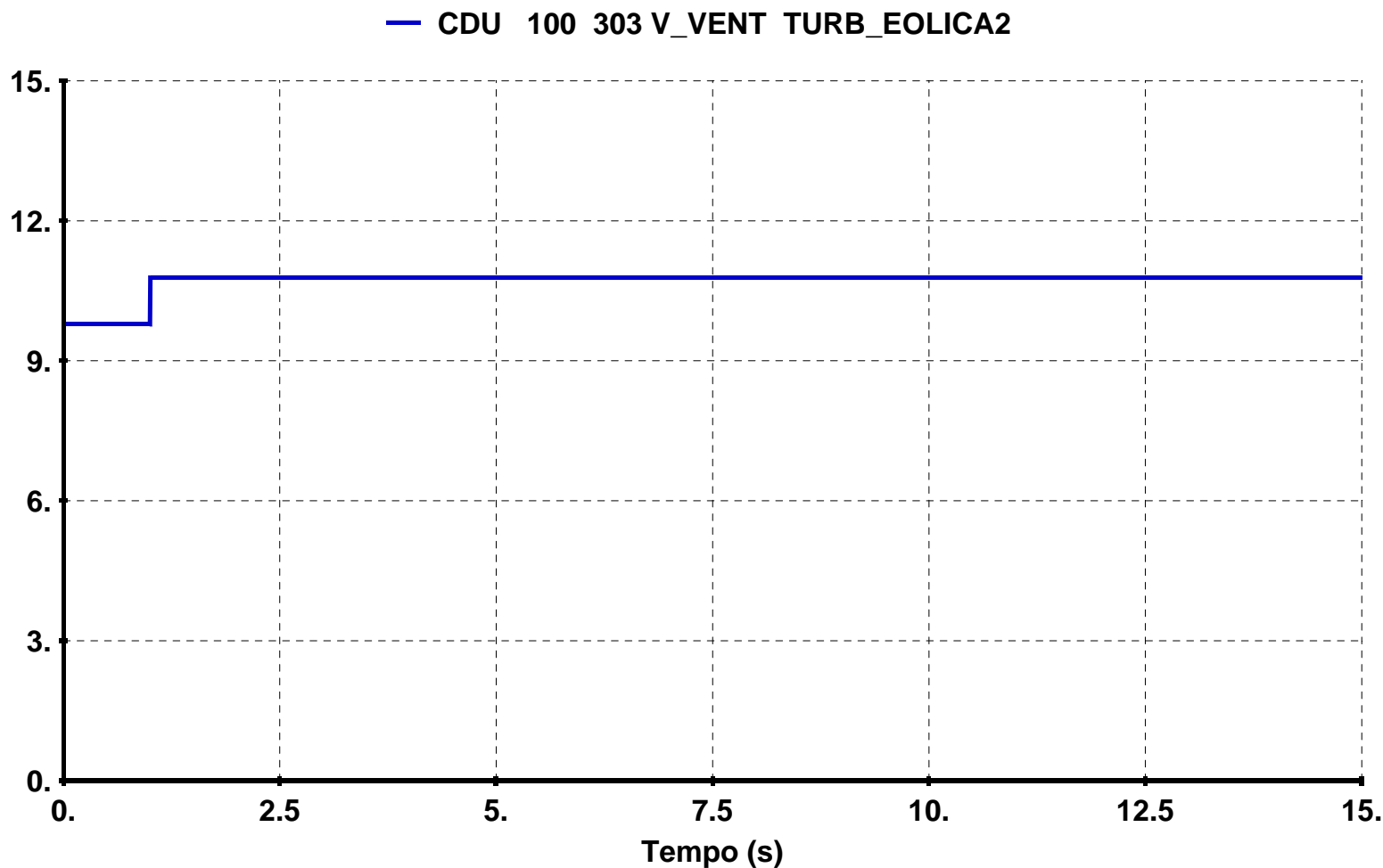
↪ Curto circuito trifásico na barra terminal

▶ Aplicado no instante  $t=1s$

▶ Duração de 260 ms

## 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

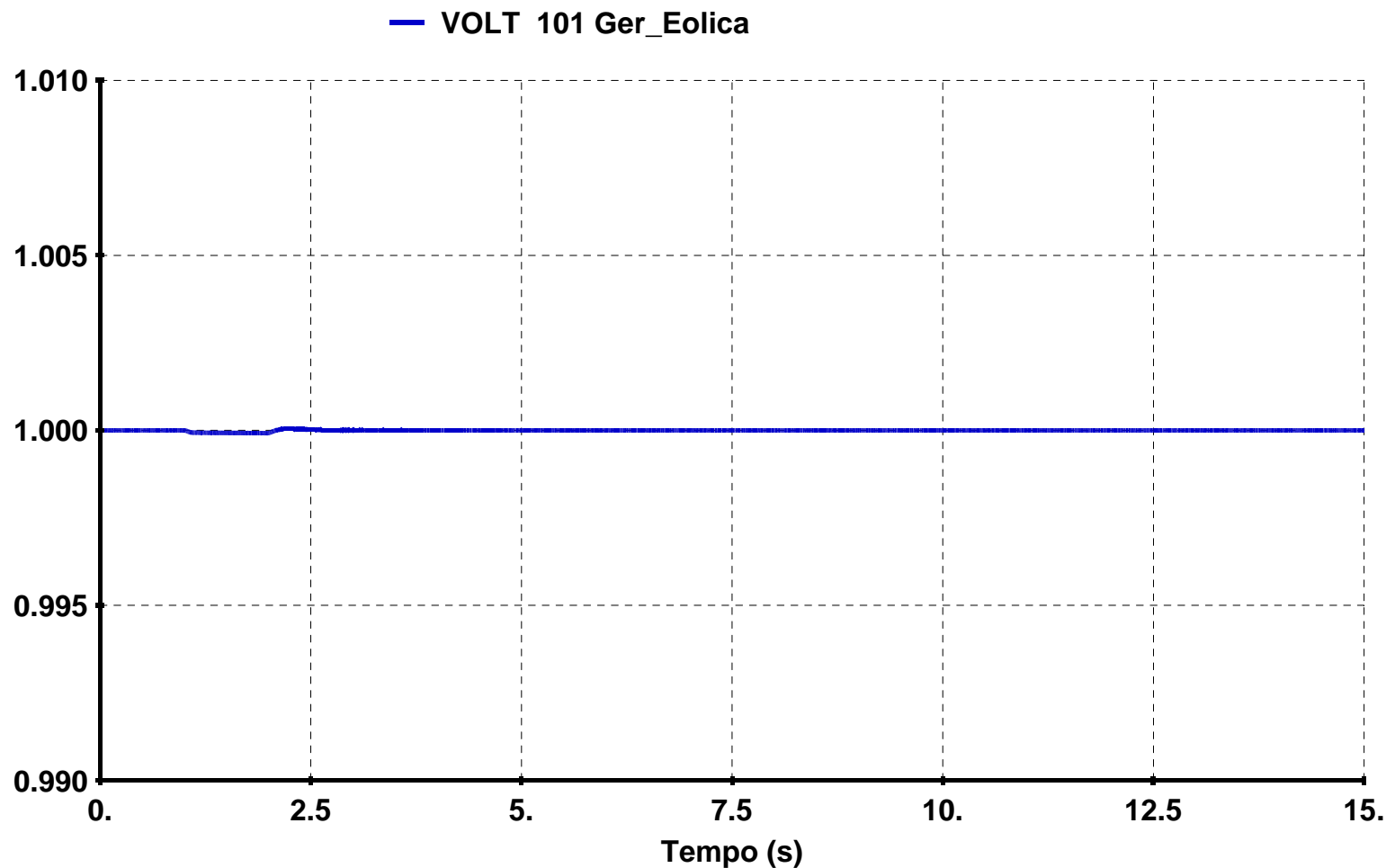
→ Velocidade do vento





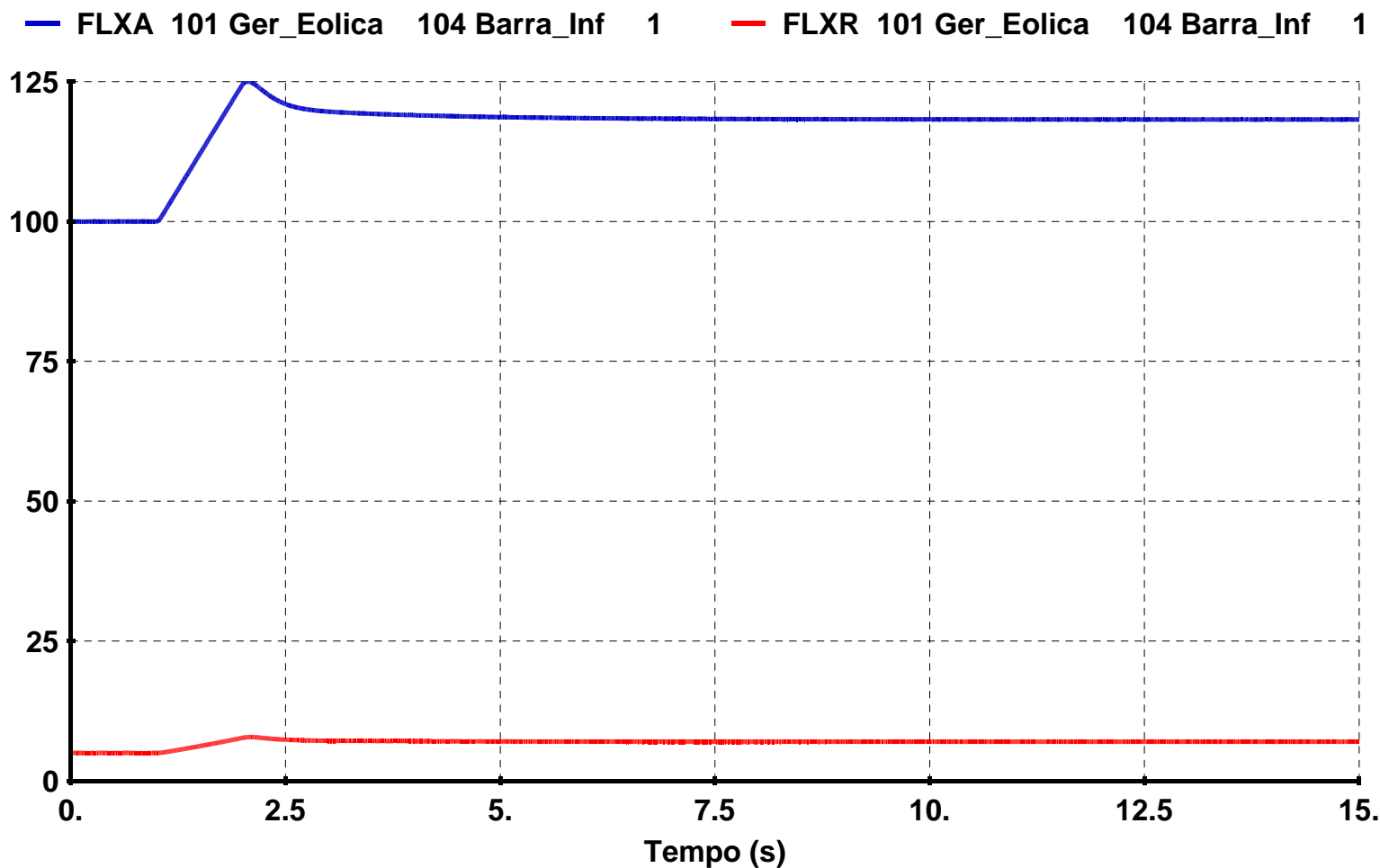
### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

→ Tensão na barra terminal do parque eólico



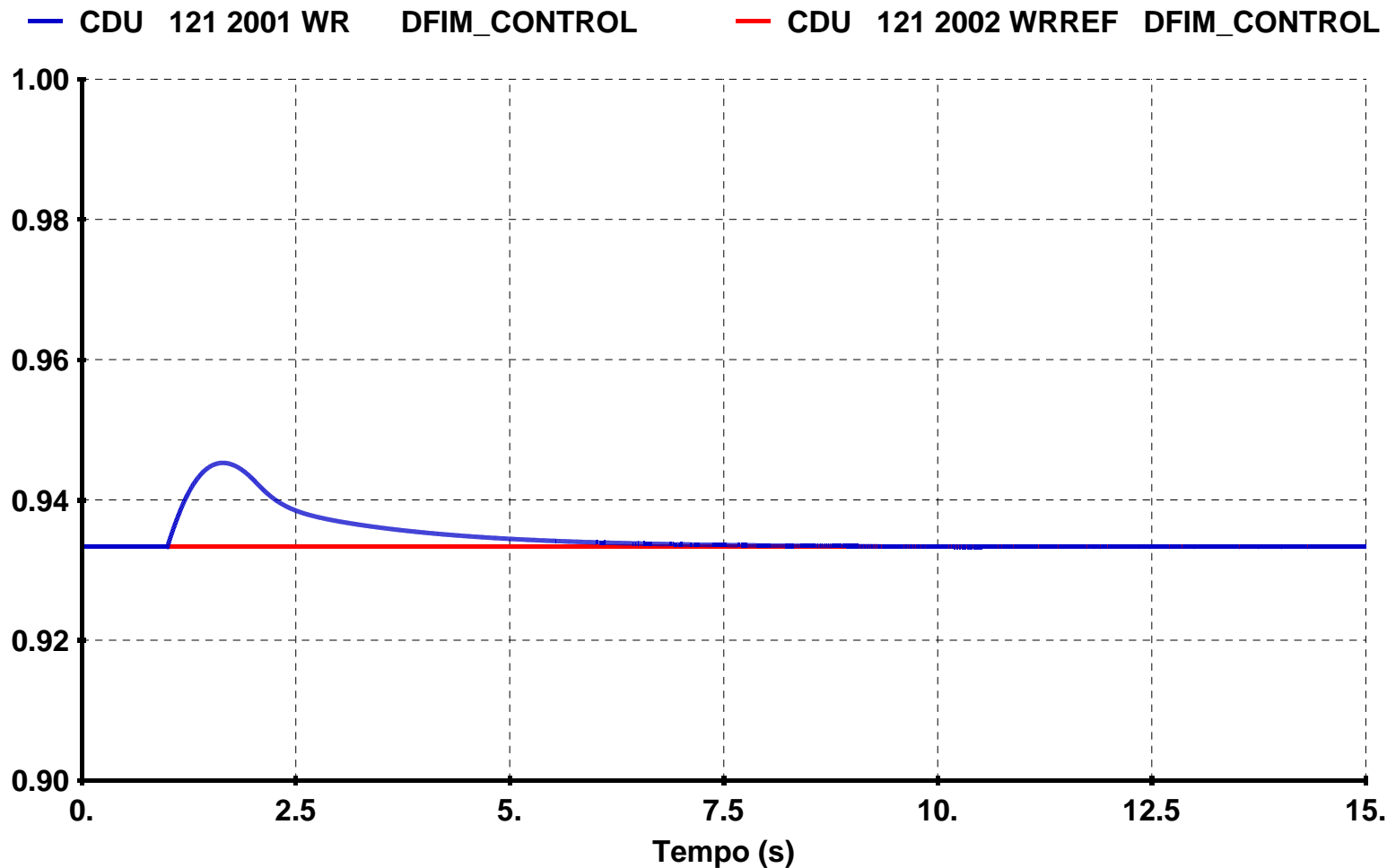
### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

→ Potência ativa e reativa na barra terminal do parque eólico



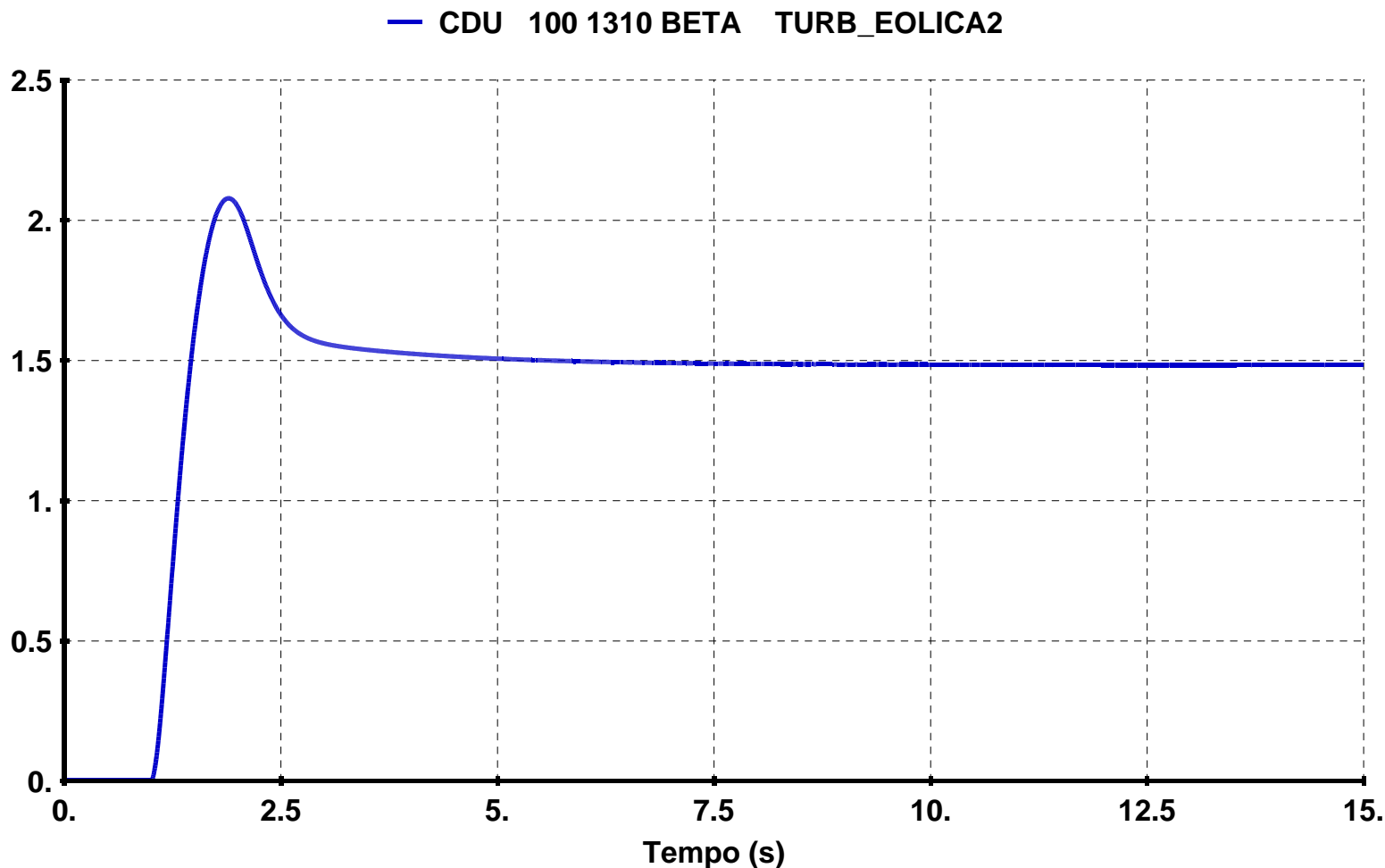
### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

→ Velocidade da máquina e velocidade de referência



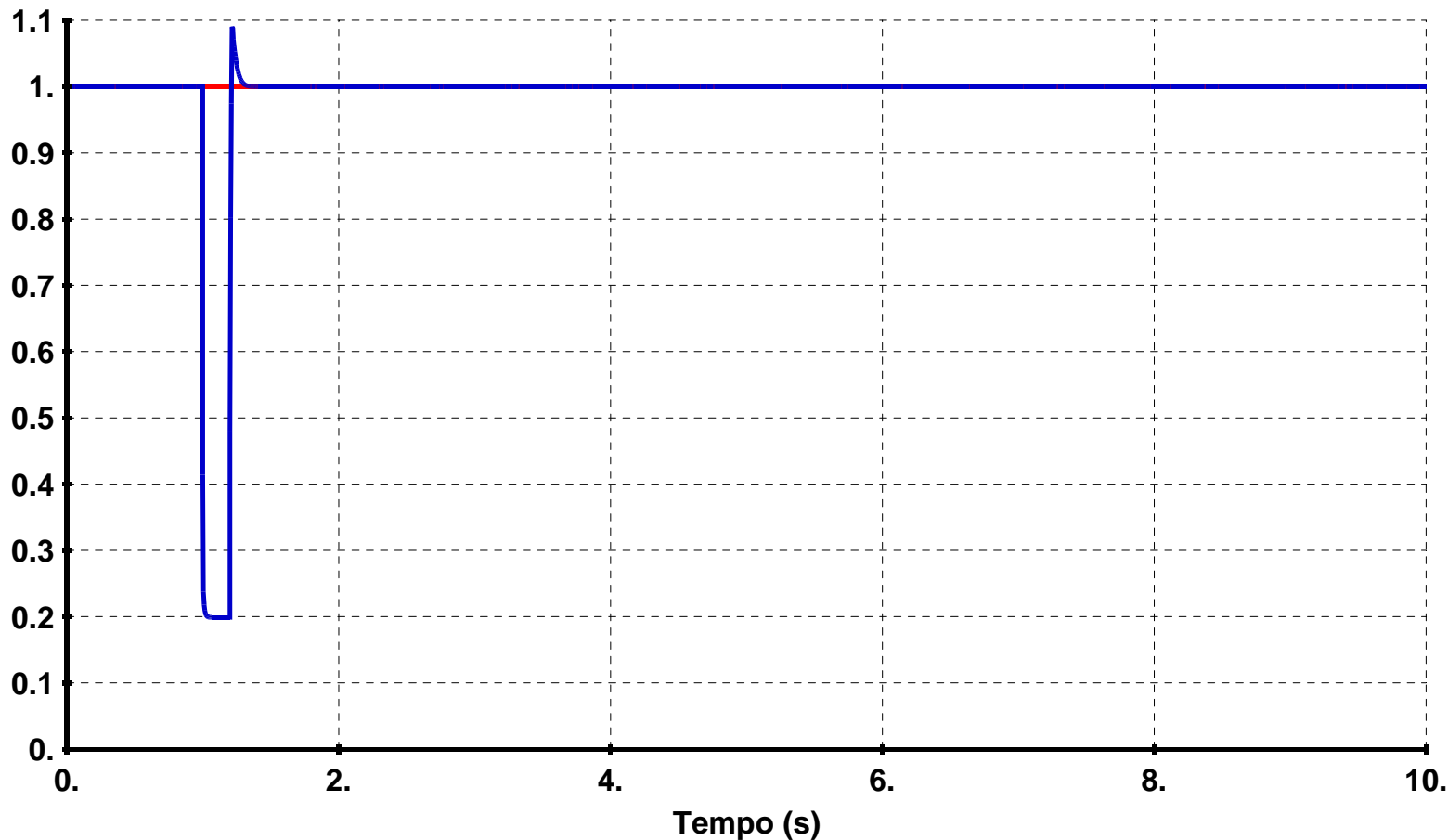
### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

→ Ângulo de posição da pá



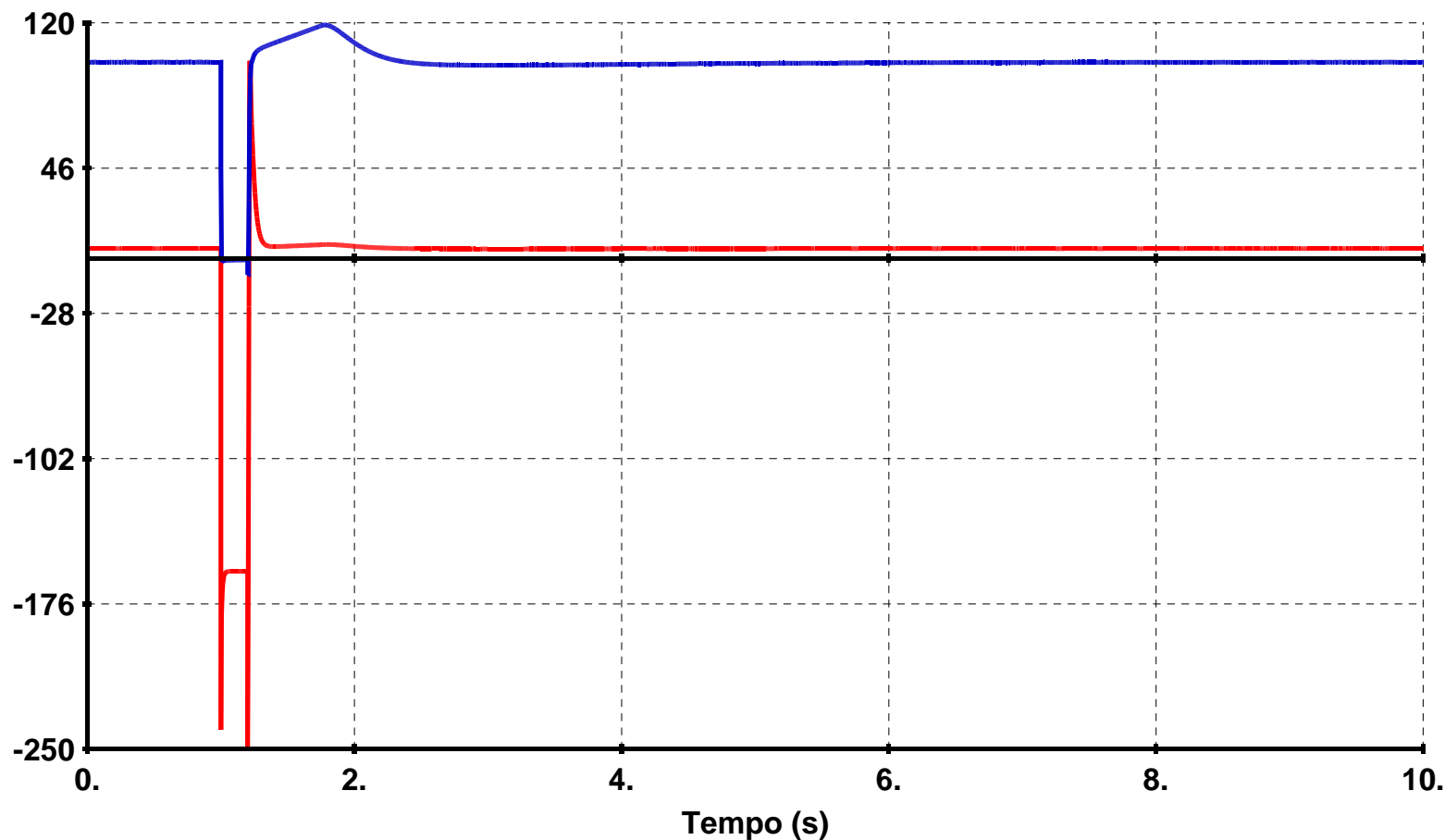
### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

→ Tensão na barra terminal do parque eólico e valor de referência (1 pu)



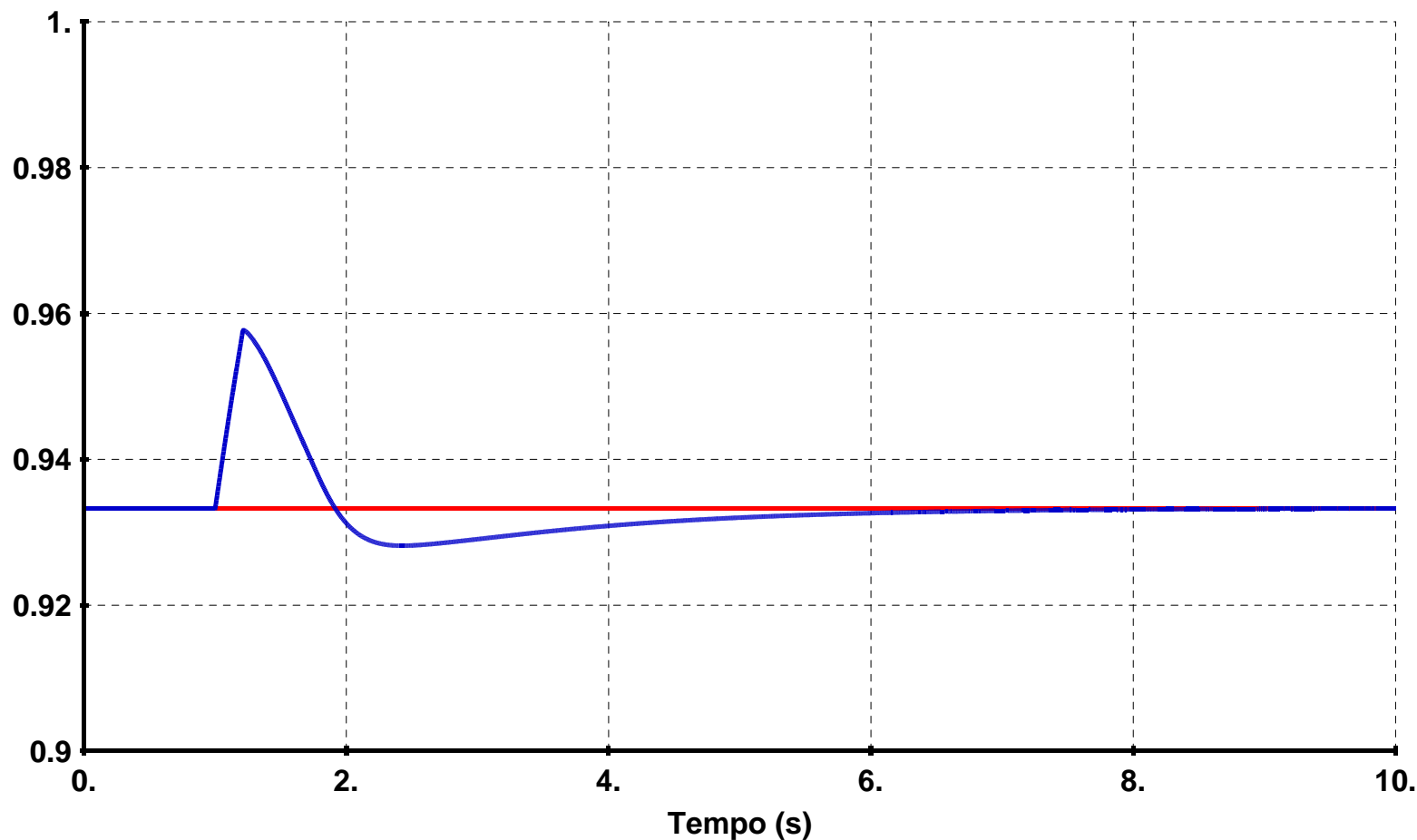
### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

→ Potência ativa e reativa na barra terminal do parque eólico

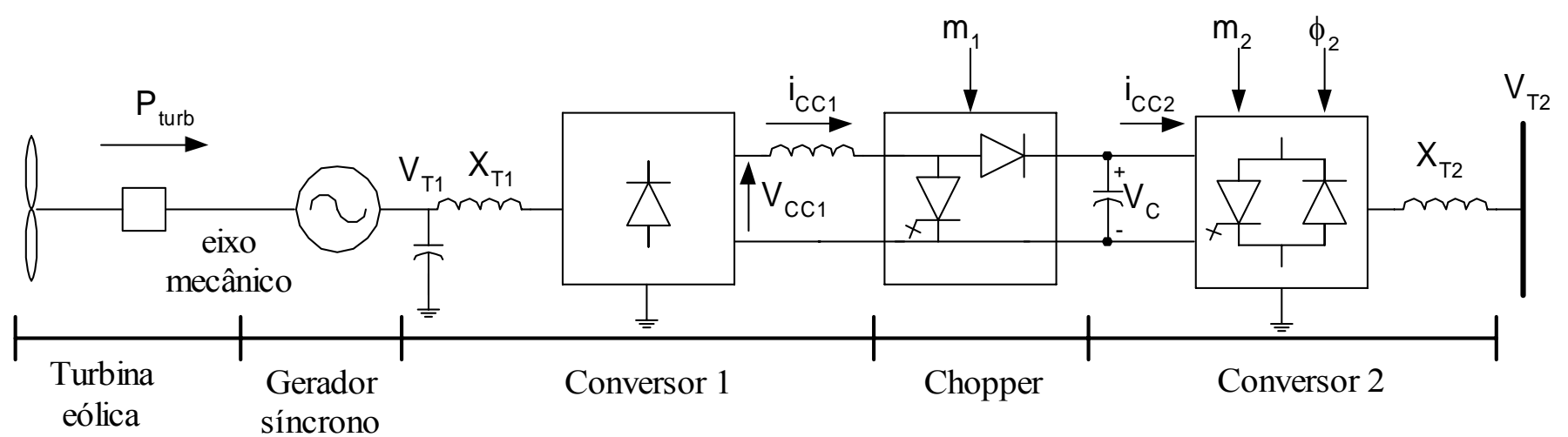


### 3.3. Máquina de Indução com Dupla Alimentação

→ Velocidade da máquina e velocidade de referência

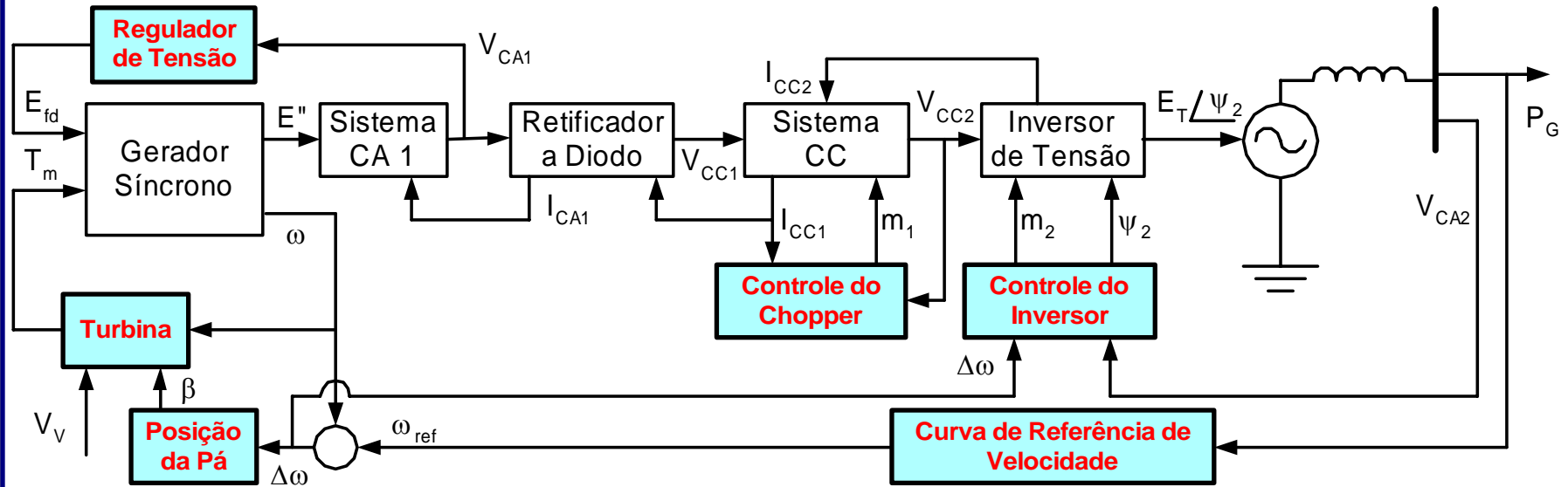


# 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável





## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável



## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

### → Chopper

↳ Controle da tensão no capacitor

### → Conversor (conectado à rede)

↳ Potência Ativa

▶ Controle da velocidade “ótima” da máquina

↳ Potência Reativa

▶ Controle da geração de potência reativa

- **Q** constante, **V** constante ou **f.p.** constante

## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

### → Sistema teste

↳ Parque eólico conectado a uma barra infinita através de uma reatância de 45% (base da máquina)

### → 10 unidades de 850 kW

↳ Despacho de 0,75 pu (6,4 MW) ou de 1,00 pu (8,5 MW)

### → Controle da tensão na barra terminal do parque eólico

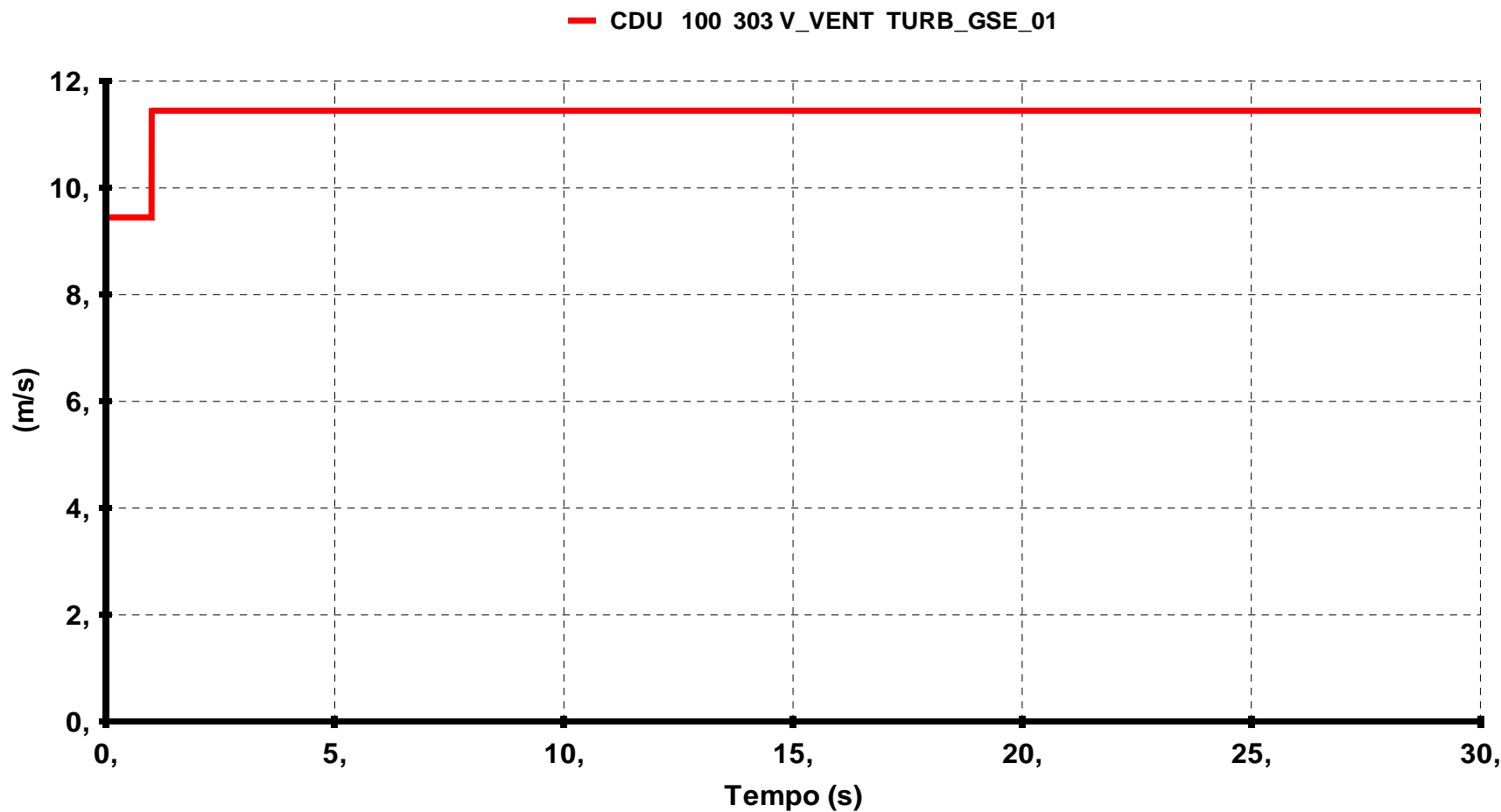
### → Distúrbios

↳ Variação na velocidade do vento

↳ Curto-circuito próximo ao parque (causando queda na tensão terminal para 0,20 pu)

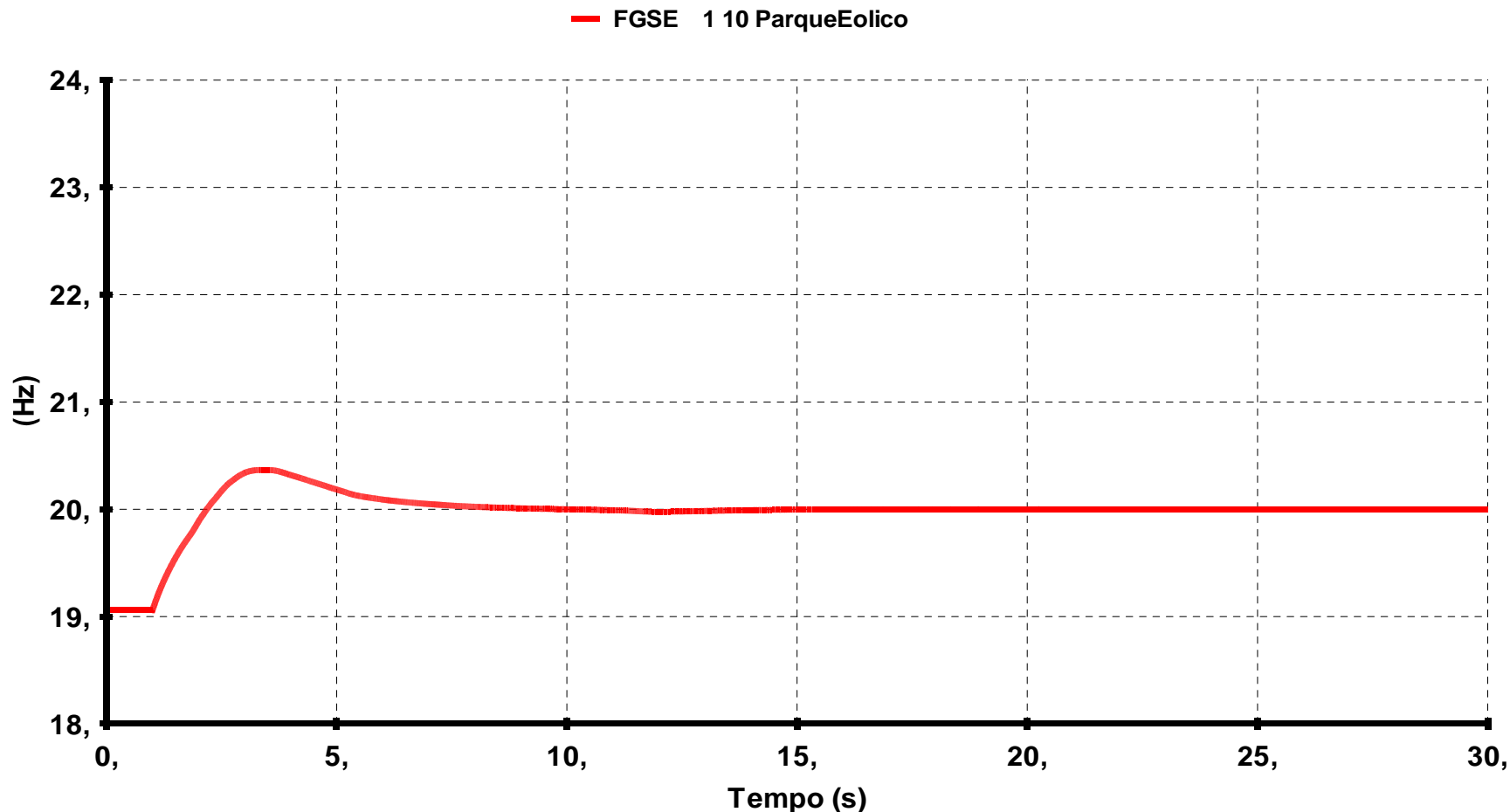
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Velocidade do vento



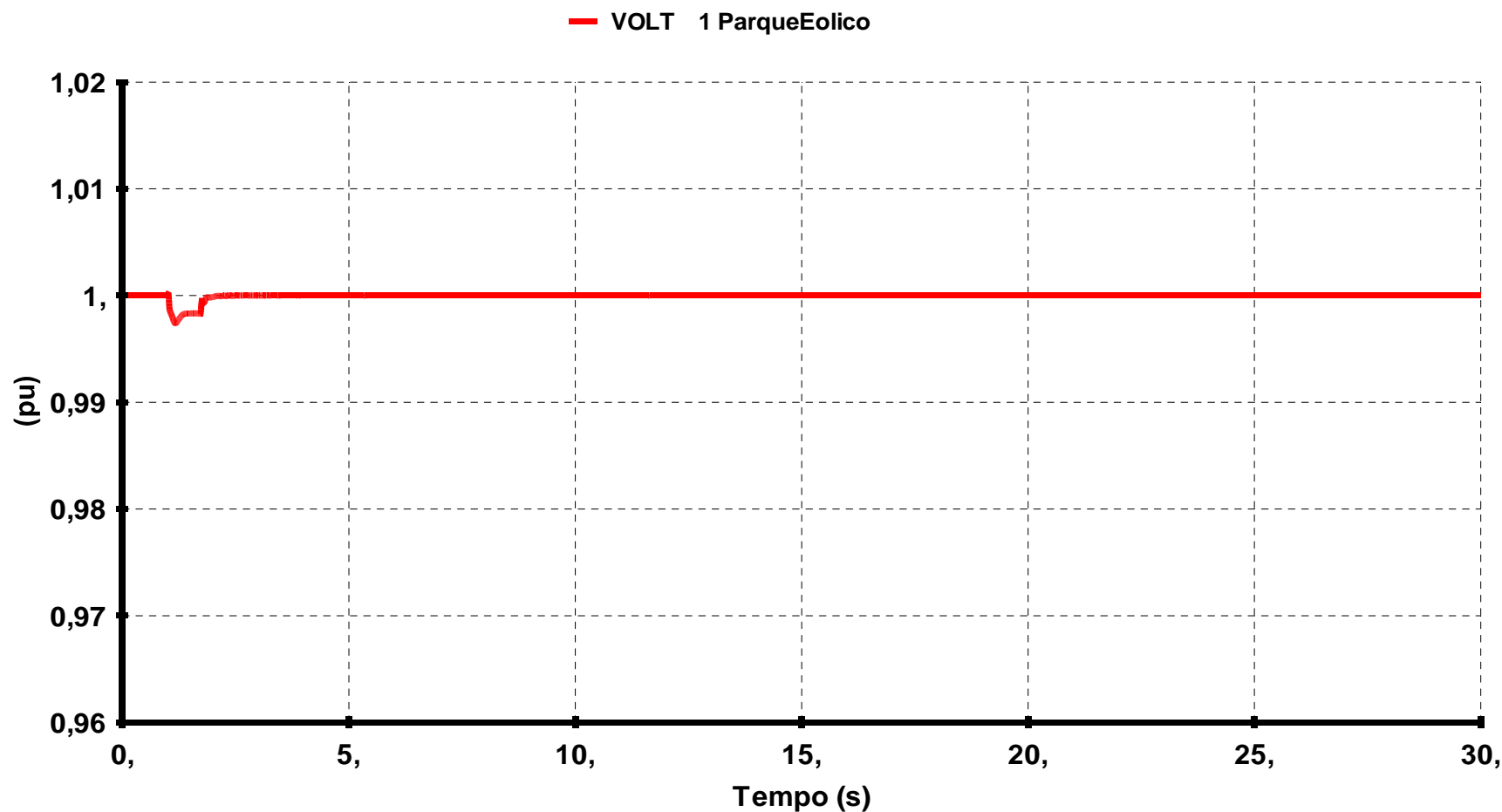
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Velocidade da máquina



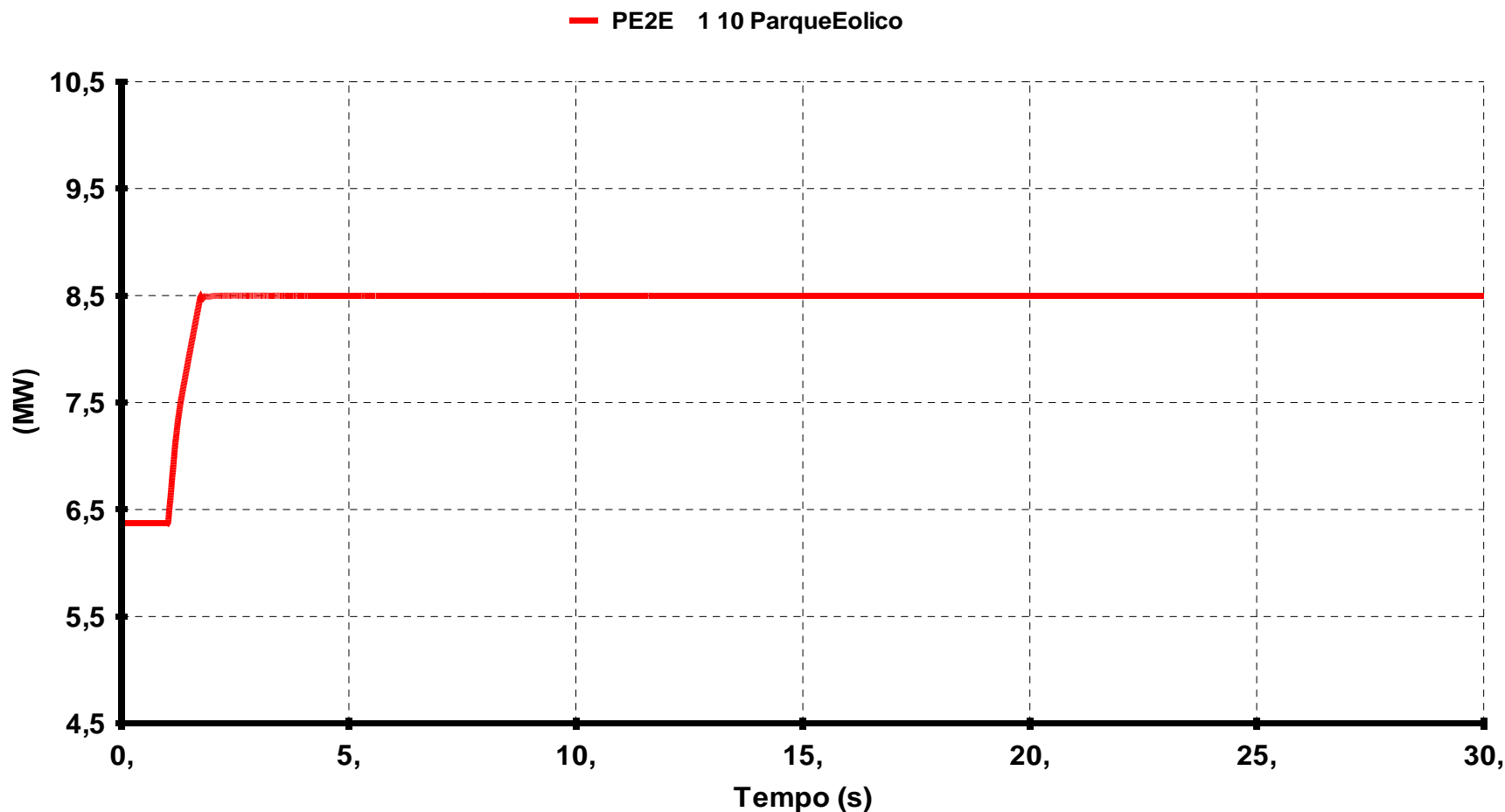
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Tensão na barra terminal



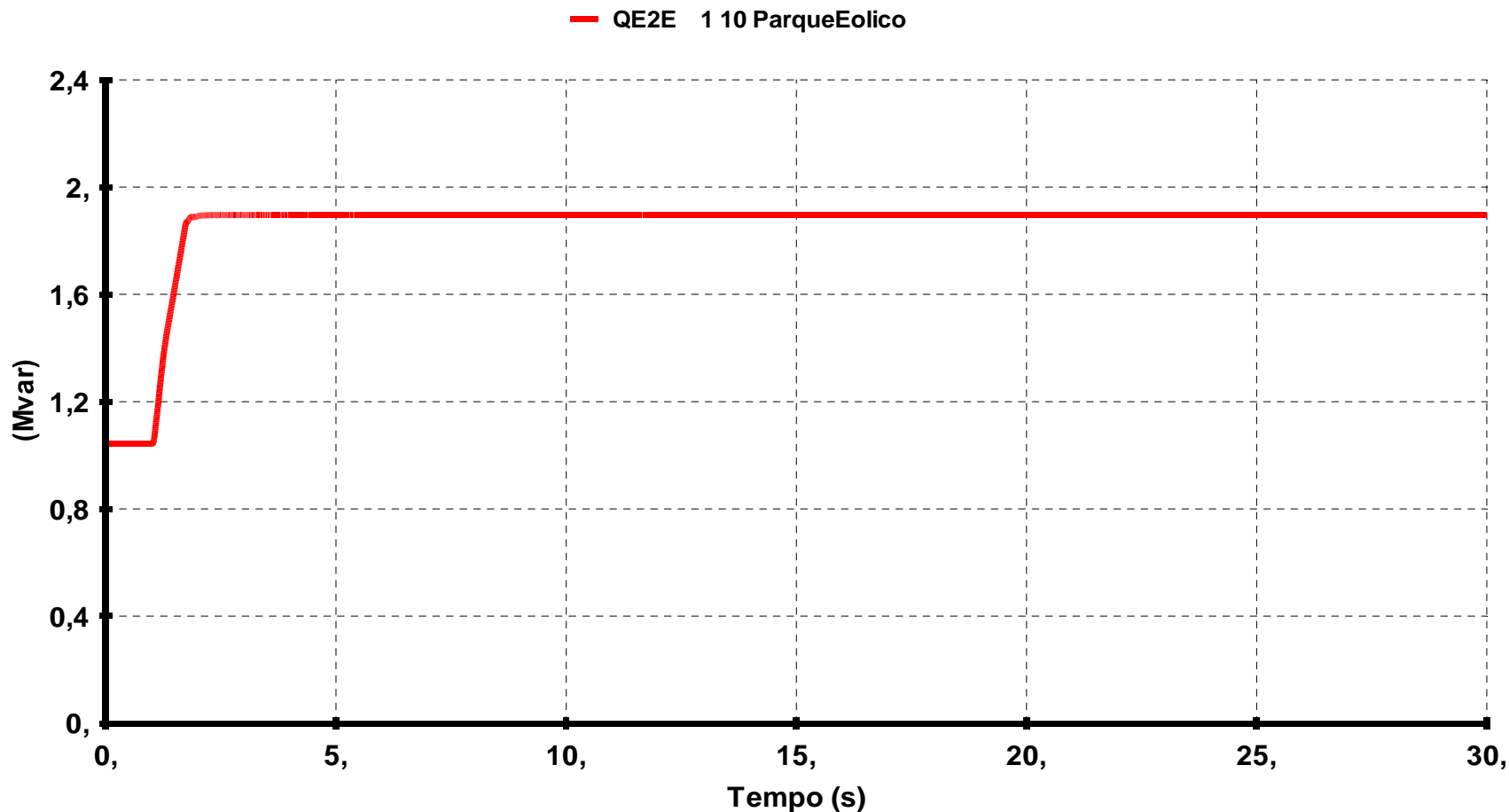
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Geração de potência ativa



## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

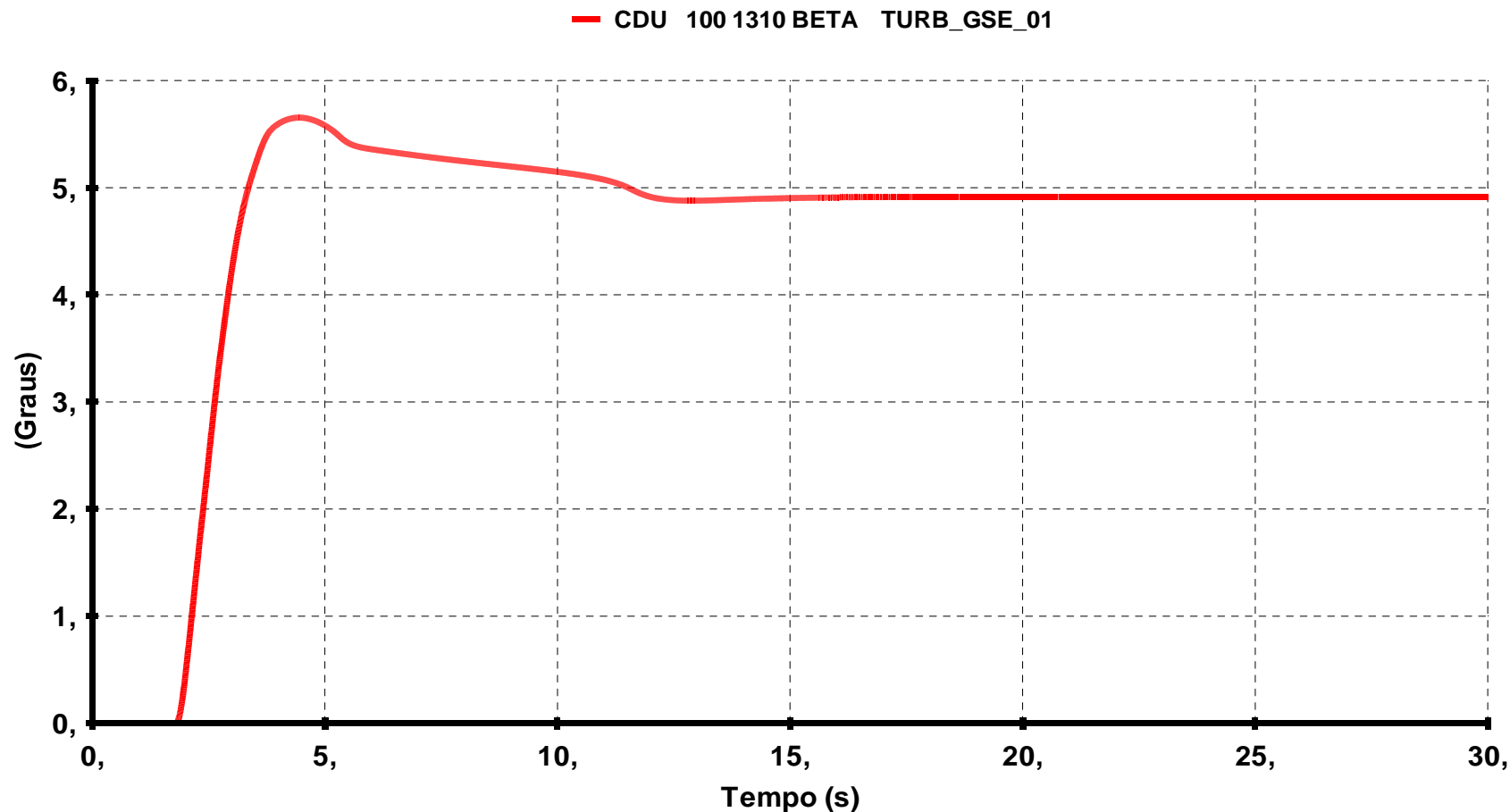
→ Geração de potência reativa





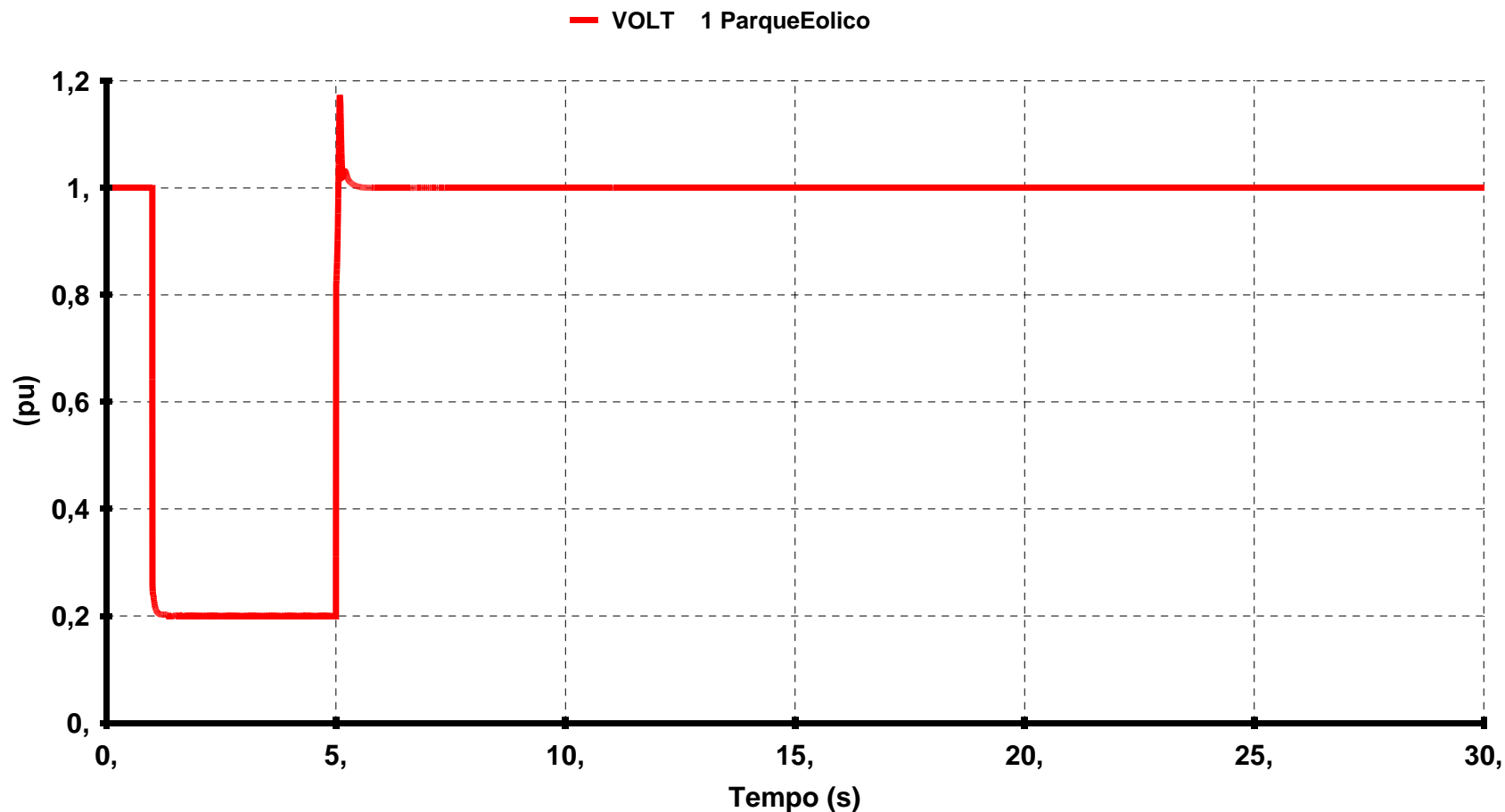
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Ângulo de posição da pá



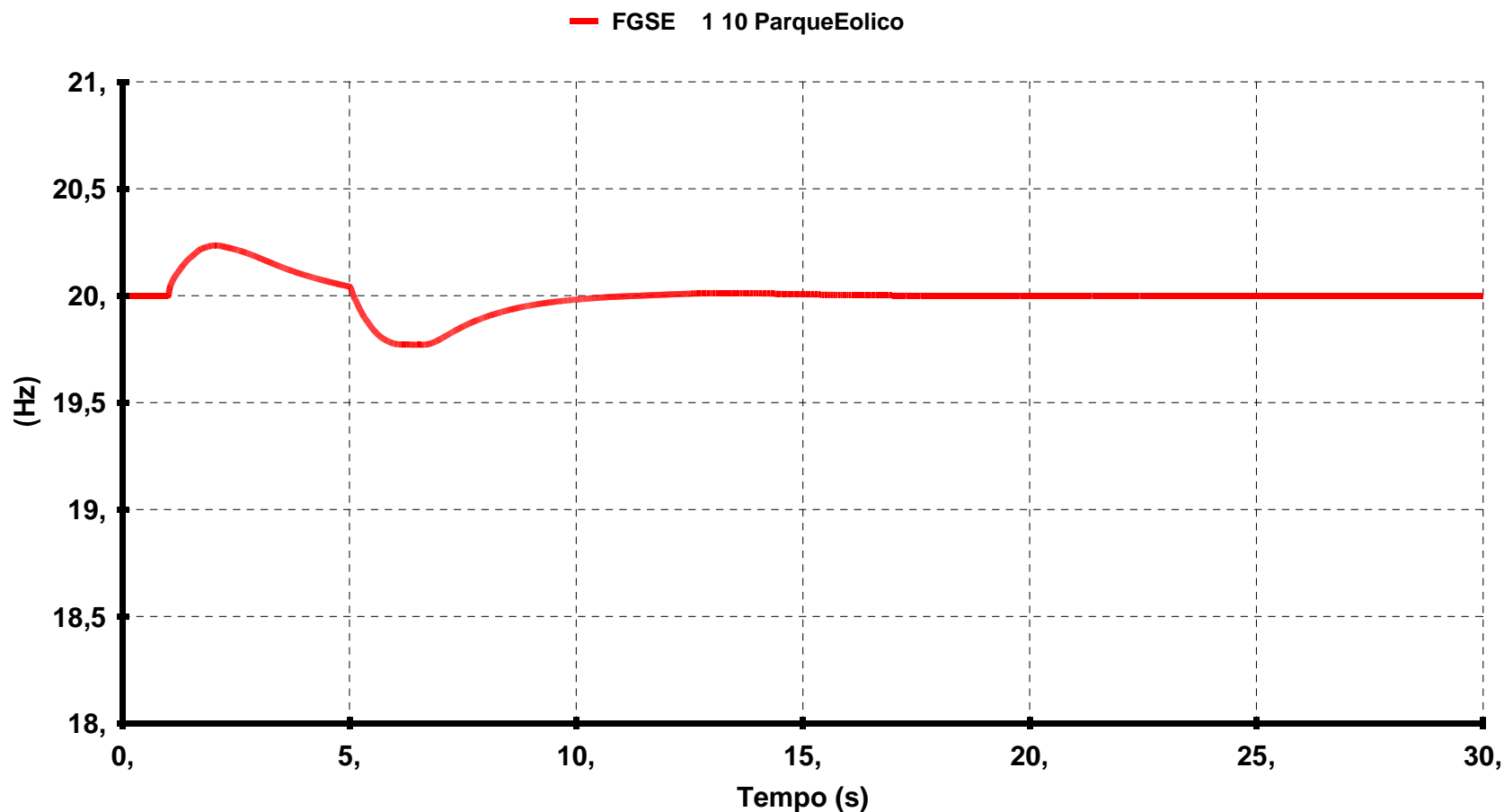
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Tensão na barra terminal



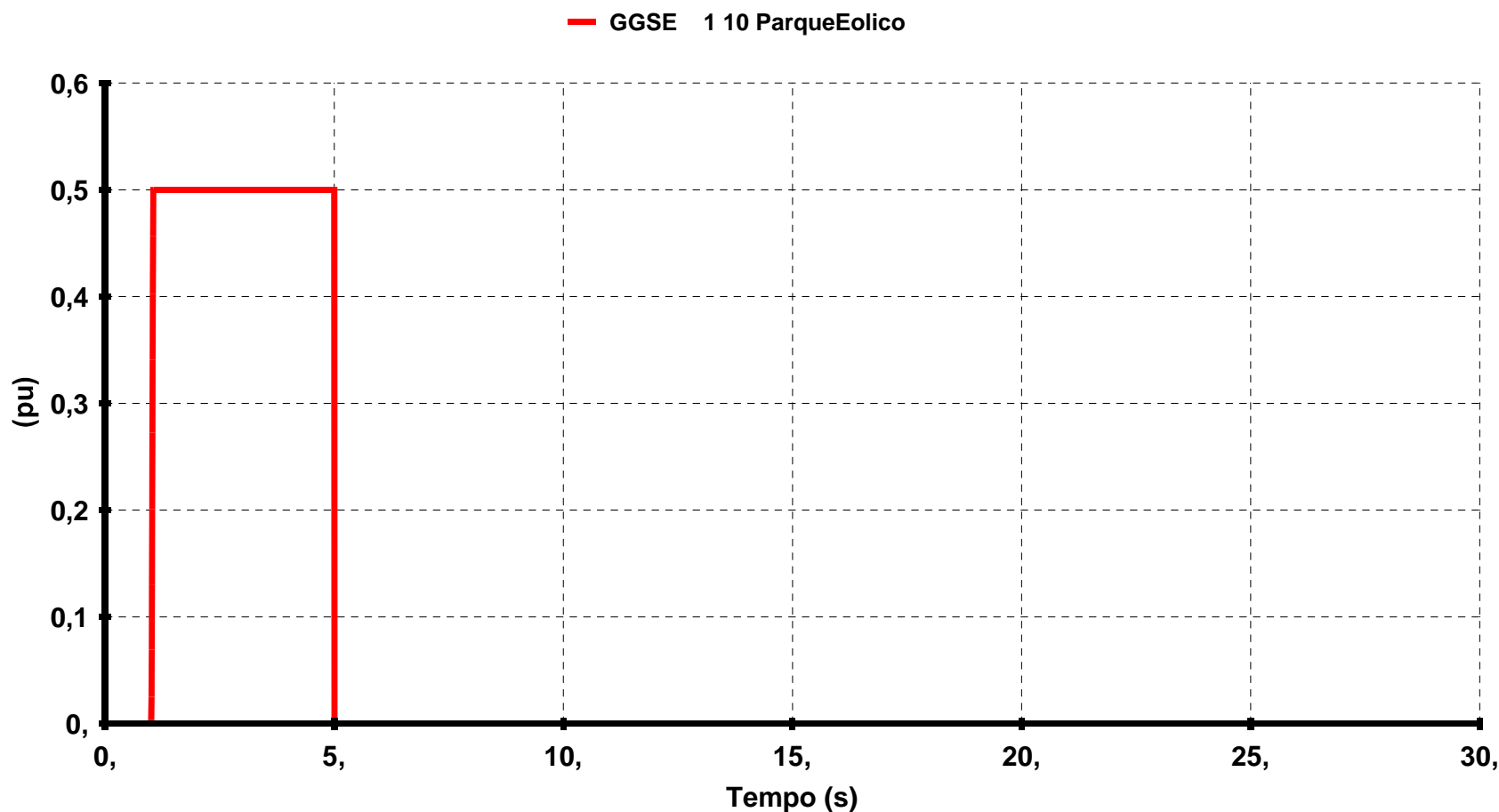
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Velocidade da máquina



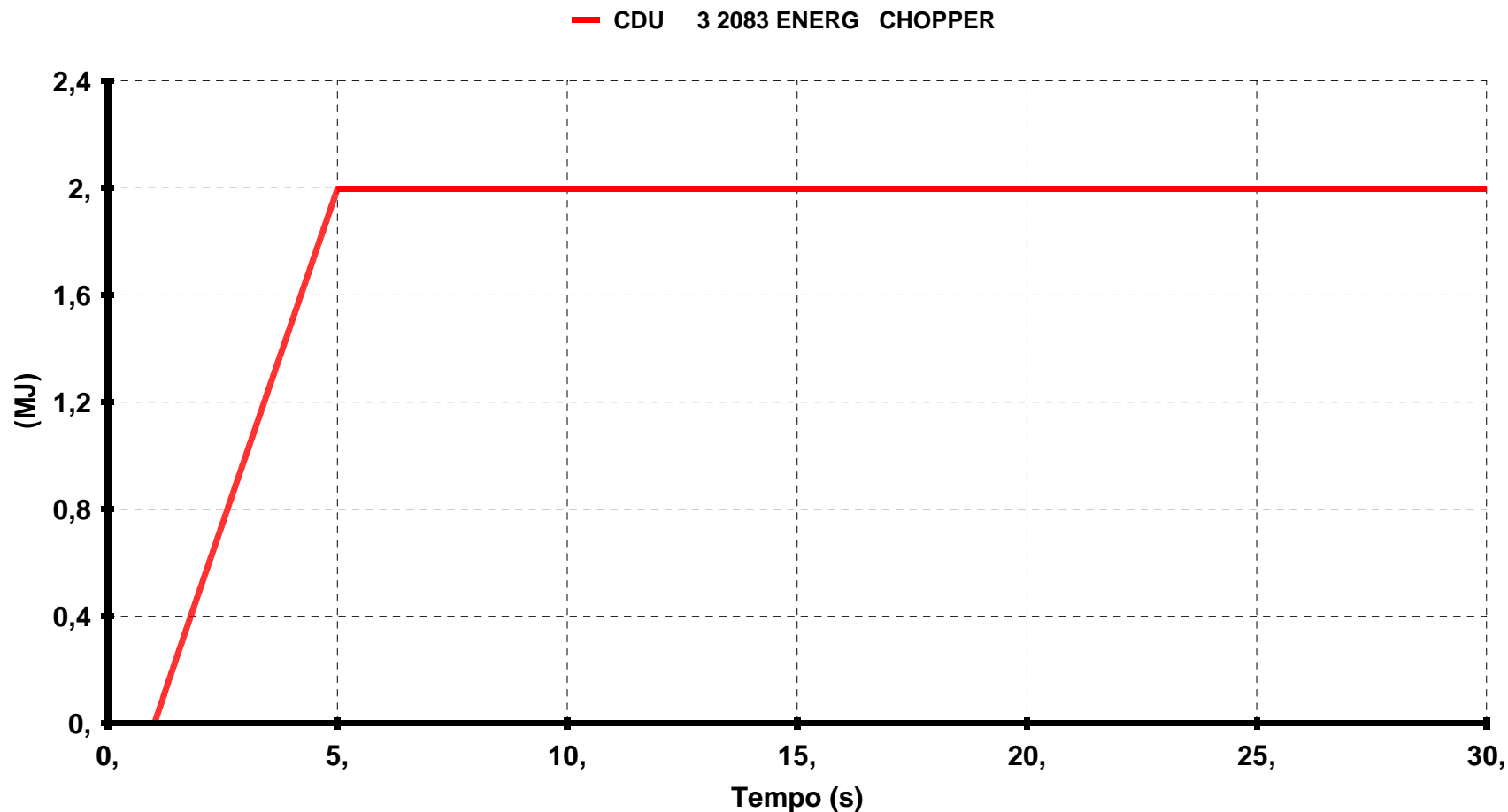
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Condutância do resistor de dissipação (inserido no curto)



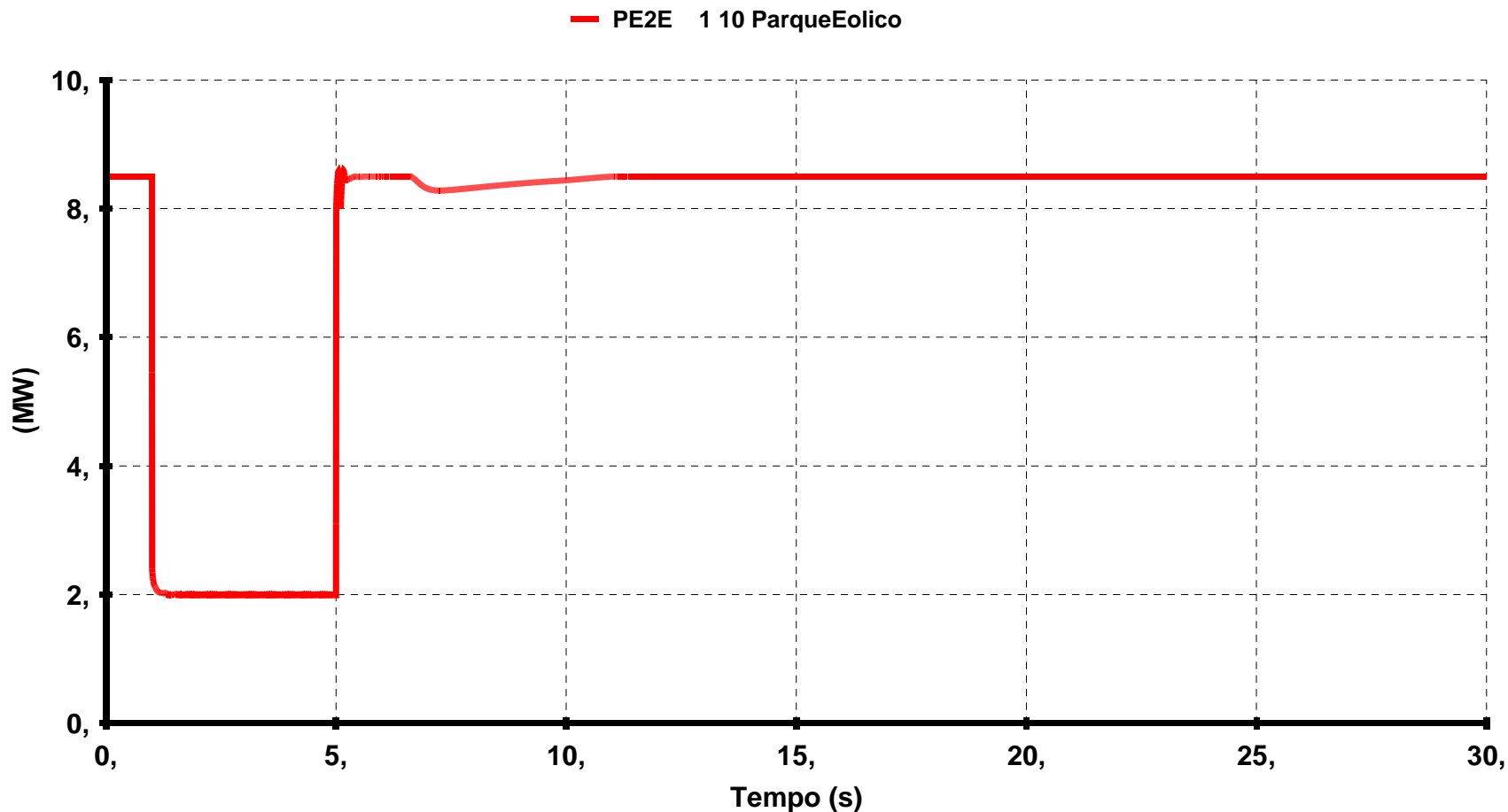
## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Energia Dissipada pelo Resistor



## 3.4. Máquina Síncrona com Velocidade Variável

→ Geração de potência ativa



## 4. Considerações Finais

- Modelos para avaliação do sistema com aerogeradores
  - ↳ ANAREDE e ANATEM disponibilizam as 3 tecnologias de aproveitamento eólico mais utilizadas na atualidade
- Os modelos são bastante gerais
  - ↳ O equipamento específico pode ser facilmente modelado a partir dos dados pertinentes a cada fabricante
  - ↳ Controle realizado via CDU permite a alteração da filosofia de controle de acordo com cada fabricante
- A versão dos programas ANAREDE e ANATEM encontram-se disponíveis para os usuários autorizados, permitindo realização de estudos elétricos