

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PGEE-UFABC**

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE PREDITIVO  
DIRETO DE POTÊNCIA APLICADO NO GERADOR DE  
INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO EM SISTEMAS DE  
GERAÇÃO EÓLICA**

Projeto de pesquisa encaminhado à FAPESP para solicitação de bolsa de mestrado

**Orientador:** Dr. Alfeu J. Sguarezi Filho  
**Email:** alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br  
**Beneficiário:** Lucas Lima Rodrigues  
**Email:** lucaslrodri@gmail.com

SANTO ANDRÉ  
NOVEMBRO DE 2016

# Preâmbulo

O trabalho aqui proposto será desenvolvido no âmbito de seu programa de mestrado na pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFABC.

Este trabalho será desenvolvido no Laboratório de Eletrônica de Potência e Smart Grids (LEPS) do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS) da UFABC sob coordenação do prof. Alfeu J. Sguarezi Filho. Os trabalhos mais recentes (Últimos quatro anos) ali desenvolvidos e em desenvolvimento envolvem estudos consolidados através de montagens experimentais em bancada, tais como:

1. Sistema de controle para o gerador de indução gaiola de esquilo - Bolsa de Mestrado FAPESP (Concluído);
2. Controle de potências do gerador de indução com rotor bobinado aplicado na geração eólica - Auxílio Regular FAPESP (Concluído) e Edital Universal CNPq (Em andamento);
3. Sistemas de controle sem fio para gerador de indução com rotor bobinado aplicado em *smart grids* - Edital Recém doutor da PROPES da UFABC (Concluído);
4. Construção de protótipo experimental para acionamento de motores de indução - Edital PNPd CAPES (Concluído);
5. Controle de sistemas fotovoltaicos e eólicos conectados à rede elétrica (Em andamento);

# Sumário

1	RESUMO . . . . .	1
2	INTRODUÇÃO . . . . .	1
3	CONTROLE CPBM APLICADO POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS DO GIDA . .	2
4	OBJETIVOS DO PROJETO . . . . .	7
5	PLANO DE TRABALHO E CRONOGRAMA . . . . .	7
6	METODOLOGIA . . . . .	8
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	8
	REFERÊNCIAS . . . . .	9

# 1 Resumo

Este projeto de pesquisa tem como objetivo o estudo de técnicas de controle preditivo baseado em modelo para o gerador de indução duplamente alimentado aplicado à sistemas de geração eólica. Neste contexto será estudado o modelo matemático dinâmico do gerador, os conversores de potência e as técnicas de controle para o sistema de geração. Para tal objetivo serão realizados estudos através de simulação e implementação prática em uma das bancadas de teste do Laboratório de Eletrônica de Potência e Smart Grids da UFABC.

## 2 Introdução

As preocupações devido às emissões de CO<sub>2</sub> tornaram a utilização de fontes de energias renováveis interessantes. Dentre elas, a energia baseada no vento se mostrou bastante promissora, pois o Brasil tem um dos maiores potenciais eólicos do mundo (AMARANTE et al., 2001).

Com o aumento da participação da matriz eólica surgem novos desafios. A velocidade do vento é uma grandeza com grande variação instantânea, podendo variar bastante em questão de horas ou, até mesmo minutos. Essa variação, se não for contornada, pode trazer problemas de qualidade de energia, como a variação da frequência da rede devido à variação do vento, principalmente em redes mais fracas e dependentes da energia eólica. Além disso, há a presença de harmônicos devido ao movimento caótico do vento e ao efeito de sombra, ou seja, a perda de potência no momento em que uma das pás passa pela torre (PINTO, 2013).

Uma das soluções para melhorar a eficiência de fontes eólicas é uso da eletrônica de potência em conjunto com geradores, como o GIDA (Gerador de indução duplamente alimentado). A escolha do GIDA ocorre devido ao seu conversor processar até 30% da potência nominal do gerador, enquanto em outros geradores com conversor acoplado esse valor chega a 100%. Isto possibilita a redução do custo do conversor (DATTA; RANGANATHAN, 2002; SIMÕES; FARRET, 2004). Nessa configuração tanto o estator quanto o rotor estão conectados à rede. Sendo o primeiro conectado diretamente (Figura 1-A) e o rotor é conectado através de uma derivação (Figura 1-C), no qual existe um conversor CA/CA bidirecional *back-to-back* (VOLTOLINI, 2007).

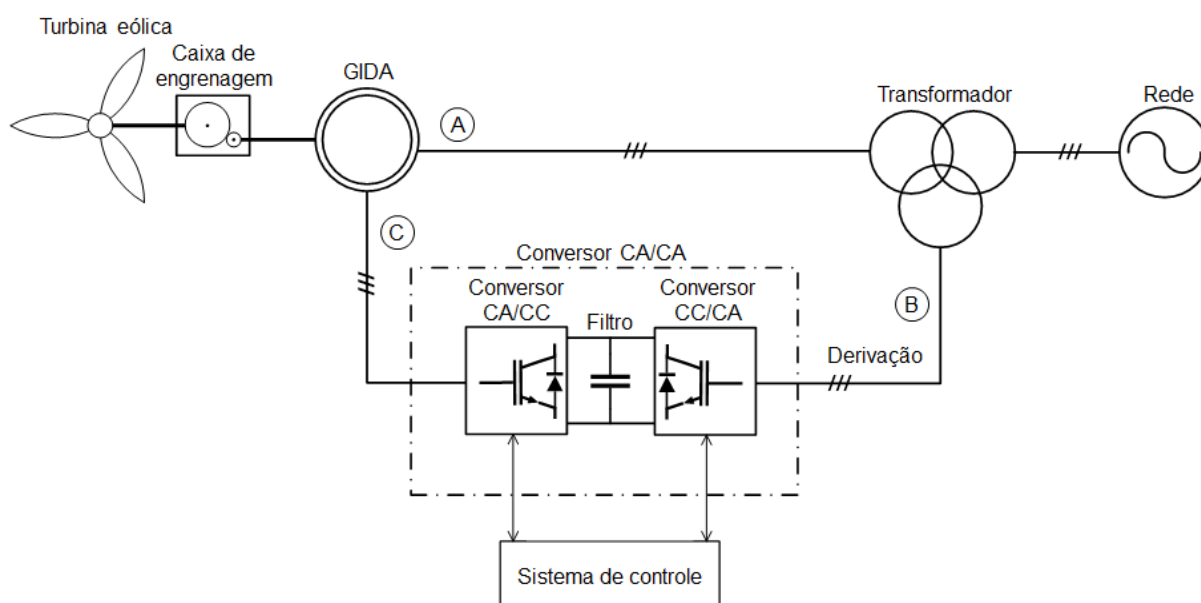


Figura 1 – Esquema do GIDA conectado à rede para geração de energia eólica (Próprio autor).

O conversor *back-to-back* é dividido em dois estágios. O primeiro converte a tensão alternada do lado voltado para a rede (Figura 1-B) em tensão contínua, que é feita através do processo de retificação e com a ajuda de um filtro capacitivo, localizado logo após a saída deste estágio. Já o segundo estágio converte a tensão contínua novamente em tensão alternada, dessa vez aplicada ao rotor (Figura 1-C). Esse processo é feito através da modulação por largura de pulso (PWM). Ambos os estágios são constituídos por pontes de *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), que são chaves semicondutoras para médias tensões. Dependendo de como as pontes de IGBT são chaveadas é possível regular a saída do conversor para tensões e frequências específicas (SGUAREZI FILHO, 2010).

As técnicas de controle vetorial por orientação do fluxo do estator, ou de rotor, ou tensão de estator, permitem controlar separadamente as potências ativa e reativa do GIDA. Essas técnicas consistem em controlar as componentes de eixo direto e em quadratura das correntes do rotor (SOUSA, 2011; PEREIRA, 2012). Inicialmente, utilizavam-se controladores proporcionais-integrais (PI) para este fim (SGUAREZI FILHO, 2010). Mais recentemente, com o avanço dos sistemas computacionais e das técnicas de controle digital, surgiram novas alternativas como o *deadbeat* (ALTUNA, 2002; MAHMOUD et al., 2005), controle preditivo de matriz dinâmica de controle (DMC) (HARNEFORS; NEE, 1998), controle preditivo baseado em modelo (CPBM) (SGUAREZI FILHO, 2010; SGUAREZI FILHO; RUPPERT FILHO, 2012) e controle preditivo generalizado (GPC) (KENNEL; LINDER; LINKE, 2001). Todas elas apresentam excelente desempenho, porém a maioria dos trabalhos encontrados na literatura se limitam apenas a simulação.

Devido ao estator do GIDA estar conectado diretamente à rede elétrica a ocorrência de afundamentos de tensão pode danificar os conversores que estão conectados aos enrolamentos do rotor. Inicialmente, a proteção empregada era um banco de resistores que eram ativados quando a falta era detectada (MORREN; HAAN, 2005; RAN et al., 2006; FRANCO et al., 2014). Com a evolução das técnicas de controle e modelagem matemática propostas como a apresentada em Lima et al. (2010) e Lima et al. (2009) possibilitaram ao GIDA operar durante o afundamento de tensão com seu conversor operando.

Sendo assim, este projeto de pesquisa tem o objetivo de preencher a lacuna existente na implementação do CPBM aplicado ao controle da potências do GIDA apresentado no trabalho de Sguarezi Filho e Ruppert Filho (2012). Possivelmente, também serão realizados testes do GIDA operando afundamentos de tensão. O sistema de controle será implementado no Laboratório de Eletrônica de Potência e Smart Grids da UFABC.

### 3 Controle CPBM aplicado potências ativas e reativas do GIDA

Os controladores preditivos levam em consideração o comportamento futuro do sistema, comparando a saída com a referência e encontrando uma função custo minimizada (CAMACHO; BORDONS, 1998; ROSSITER, 2003; WANG, 2009). Foram desenvolvidos na década de 70, mas somente ganhou força nos anos 90, ao utilizar a representação em espaço de estados em vez da função de transferência (LÖFBERG, ).

No CPBM é utilizado o modelo matemático do gerador de indução duplamente alimentado para fazer a previsão das saídas futuras sobre um horizonte de tempo finito. Depois disso, é calculada a lei de controle através da minimização da função custo. A função custo empregada nessa tese leva em consideração o erro quadrático, de modo que, ao ser minimizada, a trajetória do sistema segue para uma referência predefinida (SOUZA, 2015). A Equação da função custo é representada por (3.1). Onde  $n_1$  e  $n_y$  é o horizonte inicial e final das saídas, respectivamente,  $n_u$ , o horizonte de controle,  $\omega_{ui}$ , a ponderação no

signal de controle,  $x_i$ , a predição das saídas  $i$  passos adiante,  $r_i$ , as referências futuras e  $\delta u_i$  a variação no sinal de controle (SGUAREZI FILHO, 2010).

$$J_c = \sum_{i=n_1}^{n_y} (r_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^{n_u} \omega_{ui} \Delta u_i^2 \quad (3.1)$$

A característica antecipativa do controle preditivo é desejável em sistemas onde há a mudança rápida de referência. Além disso, é possível lidar explicitamente com as restrições, visto que estas podem ser incorporadas no processo de minimização da função custo (SGUAREZI FILHO, 2010; MACIEJOWSKI, 2002). A Figura 2 apresenta um diagrama representativo do sistema de controle preditivo.

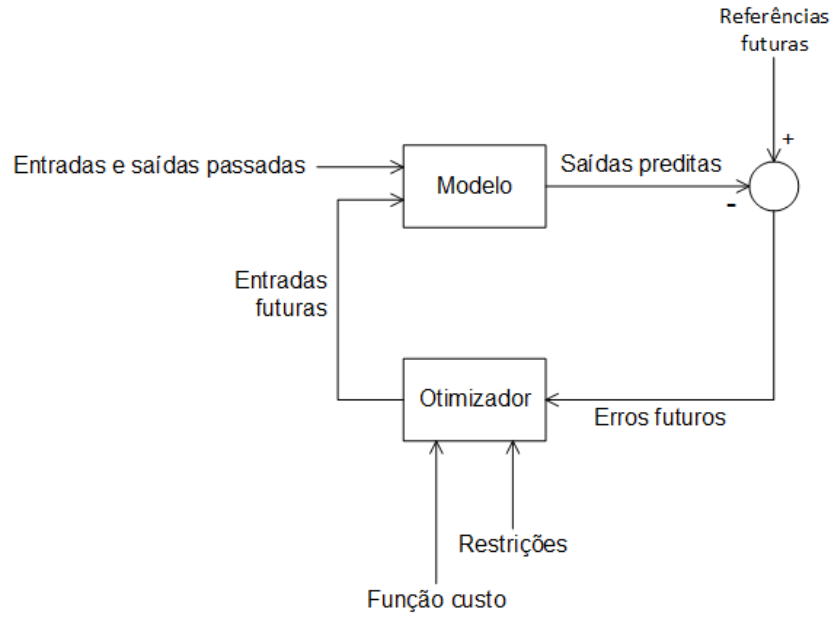


Figura 2 – Diagrama representativo do sistema de controle preditivo (SGUAREZI FILHO, 2010).

Segundo Leonhard (1985), o modelo matemático do GIDA no referencial síncrono  $dq$  girando com uma velocidade  $\omega_1$  é dado por:

$$\vec{v}_{1dq} = R_1 \vec{i}_{1dq} + \frac{d\vec{\lambda}_{1dq}}{dt} + j\omega_1 \vec{\lambda}_{1dq} \quad (3.2)$$

$$\vec{v}_{2dq} = R_2 \vec{i}_{2dq} + \frac{d\vec{\lambda}_{2dq}}{dt} + j(\omega_1 - n_p \omega_{mec}) \vec{\lambda}_{2dq} \quad (3.3)$$

A relação entre os fluxos concatenados em função das correntes são expressas por:

$$\vec{\lambda}_{1dq} = L_1 \vec{i}_{1dq} + L_M \vec{i}_{2dq} \quad (3.4)$$

$$\vec{\lambda}_{2dq} = L_M \vec{i}_{1dq} + L_2 \vec{i}_{2dq}. \quad (3.5)$$

e as potências ativas e reativas são dadas por:

$$P = \frac{3}{2} (v_{1d} i_{1d} + v_{1q} i_{1q}) \quad (3.6)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_{1q} i_{1d} - v_{1d} i_{1q}). \quad (3.7)$$

Nas equações (3.4) à (3.7)  $\vec{v}$ ,  $\vec{i}$  e  $\vec{\lambda}$  são os vetores espaciais de tensão, corrente e fluxo magnético, respectivamente. Os subíndices 1 e 2 nas mesmas Equações referem-se aos estator e rotor, respectivamente. E ainda,  $R$  representa as resistências do estator e rotor por fase,  $L$ , as indutâncias próprias do estator e do rotor,  $L_M$ , a indutância mútua,  $\omega_1$ , a velocidade síncrona,  $\omega_{mec}$ , a velocidade mecânica e  $n_p$ , o número de pares de polos da máquina.

O CPBM deste trabalho visa o controlar a potência ativa e reativa do estator através da regulação de fluxo do rotor. Ao adotar a orientação segundo o fluxo do estator o eixo direto é alinhado com vetor fluxo de estator, ou seja,  $\lambda_{d1} = \lambda_1 = |\lambda_{1dq}|$  e  $\lambda_{1q} = 0$  (SGUAREZI FILHO; RUPPERT FILHO, 2012). Utilizando-se deste fato e das Equações (3.4) e (3.5), as equações (3.6) e (3.7) podem ser reescritas:

$$P = -\frac{3v_1 L_M}{2\sigma L_1 L_2} \lambda_{2q} \quad (3.8)$$

$$Q = \frac{3v_1 L_M}{2\sigma L_1 L_2} (-\lambda_{2d} + \frac{L_2}{L_M} \lambda_1). \quad (3.9)$$

Onde  $v_1 = v_{1q} = |\vec{v}_{1dq}|$  e  $\sigma = 1 - (L_M^2)/(L_1 L_2)$ .

A equação (3.3) indica que o fluxo do rotor pode ser controlado através da tensão aplicada ao mesmo. Desprezando a resistência do rotor no cálculo da tensão em (3.3), as potências ativas (3.8) e reativas (3.9) no referencial síncrono são iguais à:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{v_{d2}(t)}{A_m} + \omega_{sl} P(t) \quad (3.10)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{v_{2q}(t)}{A_m} + \omega_{sl} Q(t) - \omega_{s1} \frac{L_2}{L_M A_m} \lambda_1. \quad (3.11)$$

Onde  $\omega_{sl} = \omega_1 - n_p \omega_{mec}$  e  $A_m = -(2\sigma L_1 L_2)/(3v_1 L_m)$ .

Segundo Ogata (2000), um sistema linear contínuo no tempo pode ser representado por espaço de estados através da equação (3.12). Onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $G$  são matrizes  $n \times n$ ,  $\bar{x}$ , o vetor de variáveis de estado,  $\bar{u}$ , o vetor de entradas,  $\bar{y}$  o vetor de saídas e  $\bar{w}$  o vetor de perturbações.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= A\bar{x} + B\bar{u} + G\bar{w} \\ \bar{y} &= C\bar{x}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Reescrevendo as equações (3.10) e (3.11) na forma de espaço de estados (3.12), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{Q} \\ \dot{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{sl} \\ -\omega_{sl} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_{sl} \frac{L_2}{L_m A_m} \lambda_1 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Neste caso, as variáveis de estado são as próprias saídas do sistema, ou seja, a matriz  $C$  é igual a identidade.

O sistema em (3.13) não é linear, pois  $\omega_{mec}$  varia com o tempo. Entretanto, a constante de tempo mecânica é muito maior que as constantes elétricas. Assim, considerando que o modelo será implementado em um sistema digital, portanto discreto no tempo. Pode-se fazer a linearização, considerando que  $\omega_{mec}$  é aproximadamente constante para cada período de amostragem,  $\omega_{sl}$  também é constante, visto que,  $\omega_1 = 2\pi f$  é fixado pela frequência da rede,  $f = 60Hz$ .

A discretização de (3.13) em um período de amostragem  $T$  através do *zero-order-hold* (ZOH) sem atraso pode ser feita pela equação abaixo (FRANKLIN; POWELL; WORKMAN, 1994):

$$\bar{x}(k+1) = A_d \bar{x}(k) + B_d \bar{u}(k) + G_d \bar{w}_d(k) \quad (3.14)$$

Onde:

$$\begin{aligned} A_d &= e^{AT} \cong I + AT \\ B_d &= \int_0^T e^{AT} B d\tau \cong BT \\ G_d &= \int_0^T e^{AT} G d\tau \cong GT \\ C_d &= C. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Substituindo (3.13) em (3.14) e (3.15), tem-se:

$$\begin{bmatrix} Q(k+1) \\ P(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{sl}T \\ -\omega_{sl}T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q(k) \\ P(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{A_m} & 0 \\ 0 & \frac{T}{A_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{2d}(k) \\ v_{2q}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_{sl} \frac{L_2}{L_m A_m T} \lambda_1 \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

A predição das saídas a partir do modelo matemático dinâmico da equação discretizada (3.16) é dada por:

$$Y = P_{px} \bar{x}(k) + HU + D\bar{\omega}_d(k). \quad (3.17)$$

Onde:

$$Y = \begin{bmatrix} y(k+1) & y(k+2) & \cdots & y(k+n_y) \end{bmatrix}^T \quad (3.18)$$

$$P_{px} = \begin{bmatrix} C_d A_d & C_d A_d^2 & \cdots & C_d A_d^{n_y} \end{bmatrix}^T \quad (3.19)$$

$$U = \begin{bmatrix} u(k) & u(k+1) & \cdots & u(k+n_y-1) \end{bmatrix}^T \quad (3.20)$$

$$H = \begin{bmatrix} C_d B_d & 0 & 0 & \cdots \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & 0 & \cdots \\ C_d A_d^2 B_d & C_d A_d B_d & C_d B_d & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ C_d A_d^{n_y-1} B_d & C_d A_d^{n_y-2} B_d & C_d A_d^{n_y-3} B_d & \cdots \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$D = \begin{bmatrix} C_d & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ C_d A_d & C_d & 0 & \cdots & 0 \\ C_d A_d^2 & C_d A_d & C_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_d A_d^{n_y-1} & C_d A_d^{n_y-2} & C_d A_d^{n_y-3} & \cdots & C_d \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

e  $n_y$  é o horizonte de predição das saídas.

Substituindo as matrizes  $A_d$ ,  $B_d$ ,  $G_d$  e  $C_d$  (3.15) do modelo de espaço de estados do GIDA discretizado (3.16) nas matrizes  $Y$  (3.18),  $P_{px}$  (3.19),  $U$  (3.20),  $H$  (3.21) e  $D$  (3.22), e utilizando as matrizes resultantes na equação (3.17), obtêm-se as saídas futuras a partir do modelo. O próximo passo é a obtenção da função custo, que pode ser computada através da equação abaixo (SGUAREZI FILHO; OLIVEIRA FILHO; RUPPERT FILHO, 2009; SGUAREZI FILHO, 2010):

$$J = (Y - \omega)^T W_y (Y - \omega) + U^T W_u U \quad (3.23)$$

Sendo que  $\omega \in \mathbb{R}^{(n_y \times q) \times 1}$  representa o vetor de referências futuras da saída a ser controlada,  $W_y \in \mathbb{R}^{(n_y \times q) \times (n_y \times q)}$  é uma matriz definida-positiva que permite enfatizar cada saída controlada.  $W_u \in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$ , também uma matriz definida-positiva, pondera o esforço de controle das entradas,  $U \in \mathbb{R}^{n_y \times n_y}$  é o vetor de entradas,  $q$  o número de saídas e  $n_u$  o horizonte de controle.



Substituindo  $Y$  de (3.17) em (3.23) resulta numa função de custo quadrático (3.1) dependente de  $U$ . Assim, podemos utilizar a expressão  $\frac{\partial J_c}{\partial U} = 0$  para encontrar o valor mínimo e obter a lei de controle:

$$U = (H^T W_y H + W_u)^{-1} H^T W_y (\omega - P_p x(k) - D \omega_d(k)). \quad (3.24)$$

Lembrando que as matrizes  $P_p x$ ,  $H$  e  $D$  devem ser calculadas a cada ciclo de controle, pois dependem do modelo linearizado, que pode mudar entre um ciclo e outro. A Figura 3 mostra o diagrama de blocos proposto para esta estratégia de controle.

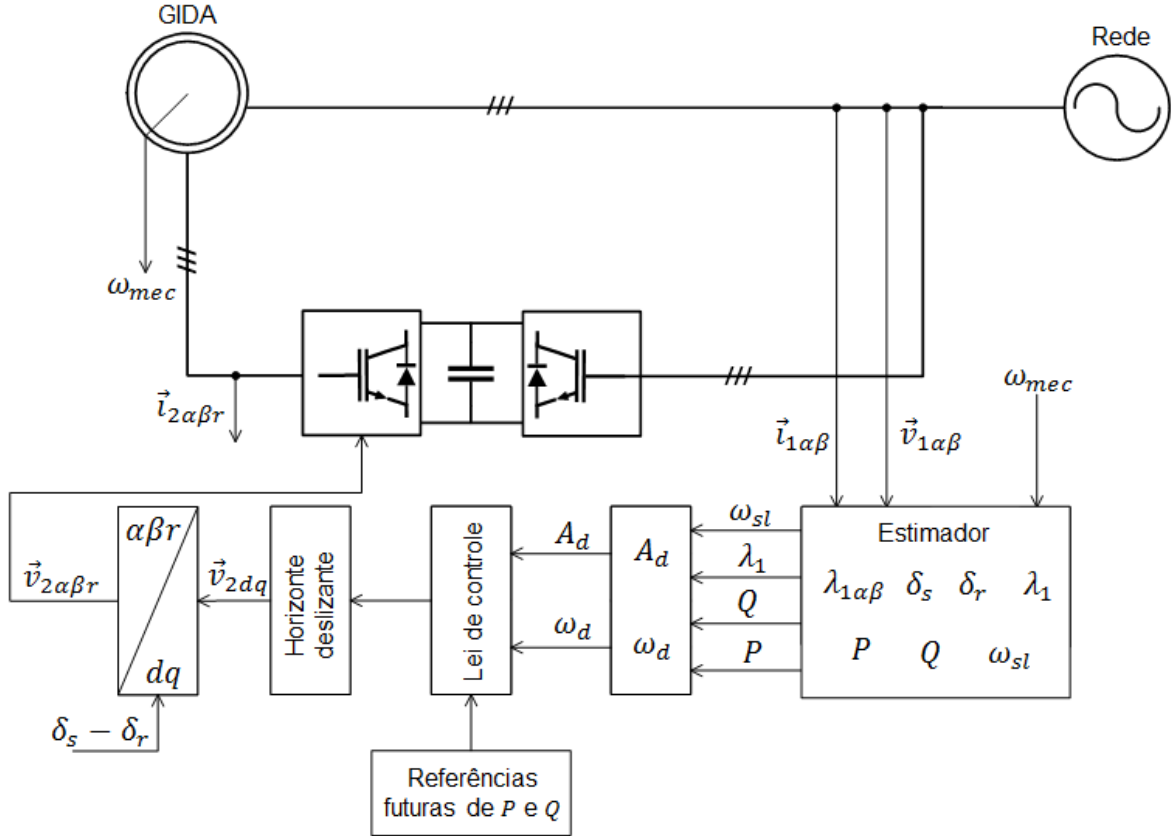


Figura 3 – Diagrama de blocos proposto para a estratégia de controle CPBM (SGUAREZI FILHO; RUPPERT FILHO, 2012).

O algoritmo de controle calcula as tensões de rotor de tal forma que as potências ativas e reativas converjam para os seus valores de referência. O vetor de tensão desejado no referencial  $\alpha\beta r$ ,  $\vec{v}_{2\alpha\beta r}$ , gera os sinais de chaveamento para o segundo estágio do conversor CA/CA com o emprego de qualquer modulação por vetores espaciais, que é dado por:

$$\vec{v}_{2\alpha\beta r} = \vec{v}_{2dq} e^{j(\delta_s - \delta_r)}. \quad (3.25)$$

$\delta_s - \delta_r$  é a diferença dos ângulos do fluxo de estator e de rotor, que pode ser calculada através da integral abaixo:

$$\delta_s - \delta_r = \int \omega_{sl} dt. \quad (3.26)$$

Esta é a estratégia de controle que será implementada na prática em uma das bancadas do LEPS da UFABC. Possivelmente, outras técnicas de controle e operação durante afundamentos de tensão poderão ser estudadas.

## 4 Objetivos do projeto

Este projeto de mestrado tem como objetivo principal implementar o algoritmo controle preditivo baseado em modelo na bancada no Lab. Eletrônica de Potência Smart Grids (LEPS) da UFABC. Outras técnicas de controle e operação durante afundamentos de tensão podem ser estudados durante o projeto.

Objetivos específicos:

- Estudo topologias dos conversores de potência;
- Estudo o modelo dinâmico do gerador duplamente alimentado;
- Estudo as técnicas de controle preditivo, especialmente a baseada em modelo;
- Projeto do CPMB de acordo com os parâmetros do GIDA e do conversor *back-to-back* da bancada no LEPS da UFABC;
- Possivelmente, estudo do controlador operando durante afundamentos de tensão;
- Simulação do controlador preditivo do item anterior no MATLAB;
- Implementação e análise do controlador do item anterior no laboratório.

## 5 Plano de trabalho e cronograma

O plano de trabalho é composto pelas seguintes etapas:

1. Estudo da bibliografia relacionada ao GIDA e as técnicas de controle preditivo (6 meses);
2. Estudar e simular o modelo dinâmico do GIDA, assim como o controlador aplicado a este gerador (6 meses);
3. Implementar experimentalmente o controlador preditivo baseado em modelo no laboratório (11 meses);
4. Análise dos resultados e correção de eventuais problemas (3 meses);
5. Elaboração do relatório final e da dissertação de mestrado (6 meses).

As Tabelas 1 e 2 apresentam o cronograma de acordo com cada etapa do projeto para o primeiro e segundo ano, respectivamente.

Etapa \ Mês	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1	x	x	x	x	x	x						
2					x	x	x	x	x	x		
3										x	x	x
4												
5												

Tabela 1 – Plano de trabalho e cronograma do primeiro ano (Próprio autor).

Etapa \ Mês	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1												
2												
3	x	x	x	x	x	x	x	x				
4								x	x	x		
5							x	x	x	x	x	x

Tabela 2 – Plano de trabalho e cronograma do segundo ano (Próprio autor).

## 6 Metodologia

A metodologia deste projeto consiste na obtenção de resultados teóricos baseados na modelagem matemática e nas simulações computacionais e compará-los com os resultados obtidos em bancada, através da implementação do mesmo algoritmo no *kit* disponível no Lab. Eletrônica de Potência Smart Grids da UFABC. A bancada é composta por GIDA acoplado em motor de corrente contínua que será usado para emular o vento, o conversor *back-to-back*, placas de condicionamento de sinais, processador de sinais TMS320F28335, osciloscópio que foram adquiridos com recursos do projeto financiado pela FAPESP n° 2013/05100-3. Sendo assim, não serão necessários recursos adicionais para a construção da bancada, além da bolsa de mestrado que está sendo solicitada.

## 7 Considerações finais

A proposta deste trabalho visa preencher a lacuna ainda existente em relação aos resultados práticos de controladores preditivos baseados em modelo em geradores de indução duplamente alimentados para sistemas eólicos. Essa linha de pesquisa tem sido de interesse de diversos pesquisadores para melhorar o desempenho dos geradores, torná-los mais robustos a variações e perturbações na rede. Além de consolidar o tema de pesquisa na formação de pesquisadores e no país.

## Referências

- ALTUNA, J. A. T. *Análise dinâmica de controladores de corrente para máquinas de indução trifásicas alimentadas por inversor PWM*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Setembro 2002.
- AMARANTE, O. A. C. do et al. In: CEPEL. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Brasil, 2001. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 21 de novembro de 2016.
- CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. *Model predictive control*. London: Springer, 1998. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). ISBN 3540762418.
- DATTA, R.; RANGANATHAN, V. Variable-speed wind power generation using a doubly fed wound rotor induction machine: A comparison with alternative schemes. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, n. 17, p. 414–421, Novembro 2002.
- FRANCO, R. et al. A deadbeat direct power control applied to doubly-fed induction aerogenerator under normal and sag voltages conditions. *Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE*, p. 1906–1911, 2014.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, M. L. *Feedback control of dynamics systems*. 3. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 1994.
- HARNEFORS, L.; NEE, H.-P. Model-based current control of ac machines. using the internal model control method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, n. 37, p. 133–141, 1998.
- KENNEL, R.; LINDER, A.; LINKE, M. Generalized predictive control (gpc)-ready for use in drive applications? *IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, p. 1839–1844, 2001.
- LEONHARD, W. *Control of Electrical Drives*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1985.
- LÖFBERG, J. *Minimax approaches to robust model predictive control*. Tese (Doutorado) — Linköping University, Linköping.
- LIMA, F. K. A. et al. Controle de gerador de indução duplamente alimentado diante de afundamentos de tensão. *Eletrônica de Potência*, v. 13, n. 3, p. 189–199, Agosto 2009.
- LIMA, F. K. A. et al. Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 25, n. 1, p. 118–130, Janeiro 2010.
- MACIEJOWSKI, J. M. *Predictive Control with Constraints*. London: Prentice Hall, 2002.
- MAHMOUD, S. et al. A simple high performance current control scheme for induction motor drives. *31th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, p. 1762–1767, Novembro 2005.
- MORREN, J.; HAAN, S. W. H. de. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 20, n. 2, p. 435–441, Setembro 2005.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 4. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2000. ISBN 9788587918239.
- PEREIRA, F. R. F. *Estudo sobre as malhas de controle das correntes do motor de indução com orientação de campo*. Tese (Graduação) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- PINTO, M. de O. *Fundamentos da energia eólica*. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN 9788521621607.
- RAN, L. et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 3, p. 652–662, Setembro 2006.
- ROSSITER, J. *Model-Based predictive control: A practical approach*. [S.l.]: CRC Press, 2003. (Control Series). ISBN 9780849312915.
- SQUAREZI FILHO, A. J. *Controle de potências ativa e reativa de geradores de indução trifásicos de rotor bobinado para a aplicação em geração eólica com a utilização de controladores baseados no modelo matemático dinâmico do gerador*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Novembro 2010.

- SGUAREZI FILHO, A. J.; OLIVEIRA FILHO, M. E. de; RUPPERT FILHO, E. A predictive power control for wind energy. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, v. 13, n. 1, p. 97–105, Janeiro 2009.
- SGUAREZI FILHO, A. J.; RUPPERT FILHO, E. Model-based predictive control applied to the doubly-fed induction generator direct power control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 3, n. 3, p. 398–406, Julho 2012.
- SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. *Renewable energy systems with induction generators*. [S.l.]: CRC Press, 2004. ISBN 9780849320316.
- SOUSA, M. H. de. *Determinação de parâmetros de máquinas síncronas pelo ensaio de resposta a frequência: Proposta de metodologia com inversor de frequência*. Tese (Graduação) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- SOUZA, E. M. de. *Controle preditivo robusto baseado em modelo aplicado a sistemas não-lineares incertos linearizados por realimentação de estados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- VOLTOLINI, H. *Modelagem e controle de geradores duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Março 2007.
- WANG, L. *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*. London: Springer, 2009. ISBN 9781848823310.