

CONTROLE DE MIT PELA RESISTÊNCIA DO ROTOR VERSUS COTROLE POR INVERSORES DE FREQUÊNCIA - UMA PERSPECTIVA DA EFICIÊNCIA E DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Resumo

Este artigo testa experimentalmente o potencial de racionalização de energia elétrica, pela utilização de motores de indução em velocidade variável, em sistemas em que a carga do sistema é variável com a velocidade. A avaliação experimental valida e utiliza-se das relações de Rateaux, que correlacionam: velocidade da motobomba, carga do sistema e potência elétrica consumida, em sistemas de bombeamento. Testes realizados em laboratório comparam o acionamento, em velocidade variável, de motores de indução com rotores em gaiola com velocidade controlada através de inversores de frequências e motor de indução de rotor bobinado com controle de velocidade através de resistências variáveis no rotor. São apresentados resultados, que possibilitam uma avaliação comparativa entre as vantagens e desvantagens de se utilizar motores de indução com rotores em gaiola, com velocidade controlada por inversores de frequências ou motores de rotor bobinado com controle por escorregamento (SC).

Palavras-chave: Racionalização de energia; inversores de frequência; controle por escorregamento.

1. INTRODUÇÃO

No projeto de uma bomba hidráulica visa-se, especificamente, o recalque de determinada vazão em certa altura manométrica, de modo a se obter o máximo rendimento. Entretanto, esta bomba poderá ser posta a recalcar vazões maiores ou menores que aquela para a qual foi projetada. As mudanças na vazão e ou na altura manométrica, irão por sua vez implicar alterações na potência necessária ao acionamento e no rendimento [1], [2], [3], [4].

Variando-se a rotação de acionamento, muda-se a curva característica da bomba, ou seja a cada ponto (H, Q) a uma rotação n, corresponde em semelhança mecânica a um outro ponto (H', Q') sob rotação n' [5], [6]. As relações de Rateaux expressam as mudanças nas grandezas H; Q; P com a variação de n, de acordo com três fatos importantes: A capacidade de vazão Q varia diretamente com a mudança da rotação n, Eq.(1); A altura manométrica total H varia com o quadrado da rotação n, Eq.(2); A potência P varia com o cubo da rotação n, Eq.(3).

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n} \quad (1)$$

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad (3)$$

A aplicação das leis de Rateaux não implica em introdução de perdas de carga e o tempo de funcionamento não é alterado [7]. Um equipamento capaz de produzir este efeito com rapidez e eficiência, em qualquer tipo de Motor de Indução Trifásico (MIT), é o inversor de

frequência, que trabalha alterando a frequência e a tensão aplicada ao motor, possibilitando controlar a sua rotação.

Outra forma é a utilização de uma técnica de controle de velocidade por resistência variável de rotor que exigirá, neste caso, obrigatoriamente a utilização de um MIT de rotor bobinado. Estudos realizados aplicaram o inversor de frequência em alguns sistemas de irrigação com este objetivo [1], [2], [3], obtendo resultados satisfatórios, uma vez que a redução da potência consumida provocada pelo uso do equipamento gerou substancial economia de energia.

1.1 Problemas do controle de velocidade através de inversores de frequência

Trabalhos tem sido desenvolvidos para estudar a influência dos inversores PWM na qualidade da energia [8], [9] e observaram que as correntes distorcidas produzidas por inversores, irão fluir pelo sistema elétrico e por consequência nas impedâncias do mesmo, podendo possuir valor considerável quando estes sistemas apresentarem baixa capacidade de curto circuito.

A Tabela 1 é parte dos resultados de um trabalho [8], no qual se estudou as distorções harmônicas total de tensão (THD_V) e a distorção total de corrente (THD_I) em sistemas cuja relação da potência de curto circuito pela potência do conversor $P_{CC} = P_{CONV}$ é variável.

Tabela 1: $THD_{V,I}$ para diversas relações $P_{CC}=P_{CONV}$.

Media P_{CC}/P_{CONV}	THD_I Corrente de Linha (%)	THD_V Tensão (Fase-Neutro)(%)
300	113,67	3,17
100	93,91	4,46
80	76,40	5,84
60	63,79	6,41
40	48,52	7,45
20	34,67	10,91

Na Tabela 1 verifica-se que com baixa potência de curto circuito a distorção harmônica de tensão é elevada.

Há grande influência nos cálculos dos índices de fator de potência, quando se considera as componentes harmônicas de tensão e corrente. A eliminação das componentes harmônicas diminui a potência ativa consumida [8], porém a diminuição da potência aparente é ainda maior, daí, observaram melhores índices de fator de potência quando da ausência de componentes harmônicas, ou quando se ignora a presença delas.

Ao estudar os efeitos da qualidade de energia elétrica sobre a operação de motores de indução trifásicos, no trabalho [9] foi testado varia das condições de alimentação em comparação com a condição de motor alimentado por tensões puramente senoidais equilibradas e simétricas.

1.2 Modelagem matemática do controle de velocidade pela variação das resistências do rotor.

Os terminais do rotor bobinado podem ser fechados com resistências adicionais. Se a resistência acrescentada a cada fase do rotor é ΔR , haverá um aumento do escorregamento para o qual ocorre o máximo torque (4). A potência que passa do estator para o rotor, potência de entreferro P_g , é dada por (5). Através de uma manipulação matemática conveniente das resistências do rotor, realizada por (6), obtém-se as componentes: (a) potência dissipada nas resistências do rotor P_{Rr} , em (7); (b) potência mecânica resultante no eixo do motor P_{em} , em (8).

A partir de simplificações, em especial, desprezando-se as perdas nas resistências do estator e as perdas no núcleo, o rendimento do MIT pode ser determinado aproximadamente por (9).

$$s_m = \frac{R_r + \Delta R}{(R_s^2 + (X_s + X_r)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

$$P_g = P_{Rr} + P_{em} = 3|\hat{I}_r|^2 \frac{R_r + \Delta R}{s} \quad (5)$$

$$\frac{R_r + \Delta R}{s} = (R_r + \Delta R) + (1 - s) \frac{R_r + \Delta R}{s} \quad (6)$$

$$P_{Rr} = sP_g \quad (7)$$

$$P_{em} = (1 - s)P_g \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_{em}}{P_g} = \frac{P_g(1-s)}{P_g} = (1 - s) \quad (9)$$

2. Metodologia

A figura 1 apresenta as estruturas, para o desenvolvimento das análises comparativas entre o MIT acionado a partir de um inversor de frequências figura 1 (a), e um MIT controlado pelas resistências variáveis do rotor figura 1 (b).

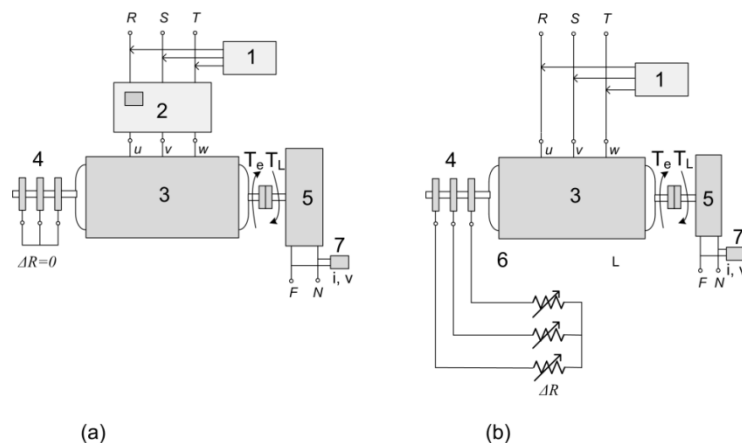


Fig. 1. (a) MIT acionado por inversor de frequências, (b) MIT controlado pelas resistências do rotor.
Onde:

1. Analisador de sinais elétricos;
2. Inversor de frequências;
3. Motor de indução trifásico de rotor bobinado;
4. Anéis dos enrolamentos do rotor;
5. Carga eletromagnética;

6. Dispositivo mecânico para variação das resistências do rotor;
7. Instrumento para medição e condicionamento dos sinais de tensão e corrente, oferecidos a carga eletromagnética;

Te é o torque elétrico desenvolvido pelo motor;

TL é o torque resistente oferecido pela carga.



Figura 2: Bancada de testes do MIT

A Fig. 2 mostra a bancada de testes montada para esse propósito. Nesta bancada o mesmo motor é utilizado para as duas condições de controle, quando o controle é feito através do inversor de frequências os circuitos do rotor são fechados em curto circuito na ligação em estrela e o motor é conectado ao inversor e através deste à rede. Quando o controle é realizado pela variação das resistências do rotor o motor tem os seus terminais do estator diretamente ligado a rede e os terminais do rotor são ligados a um conjunto de resistências variáveis formando um circuito trifásico em estrela. A carga é realizada através de um disco que utiliza o princípio eletromagnético para impor uma carga variável ao eixo da máquina.

A metodologia desenvolvida neste trabalho consistiu em:

I) Simular o desempenho de motor elétrico de indução qualquer, utilizando-se das relações de Rateaux (P , H , n), considerando variações de velocidade, em relação a nominal, para baixo, menor que 20 %;

I-a) a partir do conhecimento da velocidade do motor elétrico, sob teste, nas condições de carga nominal (n_{01} , H_1), mede-se os sinais de potência ativa nessa condição (P_{rede1}). Variar a carga, dentro dos limites de capacidade do motor, e registrar as velocidades do motor para cada carga.

I-b) calcular a velocidade (n_i) de acordo com as relações de Rateaux, equações (1) e (2), que atendem as cargas (H_i), estabelecidas no item I-a). Calcular as potências ($P2(SIM)_{Rat}$ (W)), de acordo com a equação (3), para cada relação (n_i , H_i);

II) Testar o desempenho de um motor elétrico de indução, com rotor bobinado, em bancada laboratorial; II-a) testar o desempenho do motor alimentado diretamente da rede, nas condições de velocidade nominal, carga nominal e frequência (n_0 , H_0) e com variação da carga

em frequência nominal (n_i, H_i); II-b) testar o desempenho do motor alimentado com o inversor de frequências em 60 Hz, e em carga variável. A carga seguindo as variações propostas nas relações de Rateaux, simuladas no item (I-c); II-c) com controle de velocidade pela variação das resistências do rotor, e carga seguindo as variações propostas nas relações de Rateaux, simuladas no item (I-c). Para todos os testes registrar os resultados de potência (P_i, n_i), (Q_i, n_i) e (S_i, n_i), (THD_I, THD_V) e (FP), para essas condições;

II-a) Com as bobinas do rotor do motor de indução e curto circuito, resistências externas ao rotor nula. Com os seus terminais diretamente ligados a rede elétrica, acionar o motor de indução, com carga frequência e velocidade nominais e registrar as grandezas: (P_I, n_I), (Q_I, n_I) e (S_I, n_I), (THD_I, THD_V) e (FP);

II-b) Ligar a rede elétrica trifásica a entrada de um inversor de frequências e a saída deste aos terminais do motor de indução. Com as bobinas do rotor em curto circuito ajustar, através do inversor de frequências, as velocidades (n_i) e através do dispositivo de controle da carga eletromagnética, ligada ao eixo do motor, ajustar a carga (H_i), que corresponda as relações de Rateaux, com valores idênticos aos simuladas no item I-b), medem-se os resultados de potência (P_i, n_i), (Q_i, n_i) e (S_i, n_i), (THD_I, THD_V) e (FP), para essas condições;

II-c) Ligar a rede elétrica trifásica diretamente aos terminais do motor de indução com resistências externas variáveis no rotor. Com as bobinas do rotor ligadas diretamente a um conjunto trifásico de resistências externas, variar as resistências para proporcionar as velocidades (n_i) e através do dispositivo de controle da carga eletromagnética, ligada ao eixo do motor, ajustar a carga (H_i), que corresponda as relações de Rateaux, com valores idênticos aos simuladas no item I-b), medem-se os resultados de potência (P_i, n_i), (Q_i, n_i) e (S_i, n_i), (THD_I, THD_V) e (FP), para essas condições;

III) Confrontar os resultados elétricos do motor de indução obtidos no item (II), pela aplicação das duas técnicas de controle de velocidade com as condições básicas estabelecidas pela aplicação das relações de Rateaux item (I). Medir as perdas do inversor de frequência em condições de carga, velocidade e frequência nominais, estimar as perdas por escorregamento na técnica de controle por resistências do rotor.

A Tabela I simula a potência ativa presumida $P2(SIM)\text{-}Rat$ (W), utilizando-se das relações de Rateaux, para condições variadas de carga, H_i e velocidade, n_i e calcula os percentuais de potência salva $P2(SIM)\text{-}Rat$ (%), equação (10) para cada condição de carga e velocidade. Para os subsidiar os cálculos utiliza se dos parâmetros de velocidade n_0 (rpm) medidos em bancada nas condições de alimentação, frequências, tensões e correntes, nominais, com a variação somente das cargas H_i .

$$P2(SIM)\text{-}Rat(\%) = 100 \cdot \left(\frac{P_{rede1} - P2(SIM)\text{-}Rat}{P_{rede1}} \right) \quad (10)$$

Para os cálculos dos valores percentuais de variação da velocidade n_2 (%) e H_i (%) utiliza-se as equações (11) e (12), respectivamente.

$$n_2(\%) = 100 \cdot \left(\frac{n_{0i} - n_i}{n_{0i}} \right) \quad (11)$$

$$H_i(\%) = 100 \cdot \left(\frac{H_1 - H_i}{H_1} \right) \quad (12)$$

Tabela I - Simulação da potência ativa presumida em velocidade e carga variável pela simulação das relações de Rateaux.

	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	MED
<i>Carga (H_i)</i>	4,2	4	3,8	3,6	3,4	3,2	
n_0 (rpm)	1682	1690	1695	1704	1709	1717	
n_i (rpm)	1682	1649	1612	1578	1538	1500	
n_2 (%)	0	2,4	4,9	7,4	10,0	12,6	
H_i (%)	0	4,76	9,5	14,2	19	23,8	
P_{rede1} (W)	732,80						
$P2(SIM)_Rat$ (W)	732,80	689,70	628,28	608,65	552,21	516,60	621,37
$P2(SIM)_Rat$ (%)	0	5,88	14,26	16,94	24,64	29,50	

Para o cálculo de $P2(SIM)_Rat$, são realizadas manipulações na equação (3) e tem como resultado a equação (13)

$$P2(SIM)_Rat = P_{rede1} \cdot \left(\frac{n_i}{n_{oi}}\right)^3 \quad (13)$$

Onde $P_{rede1} = 732,80$ W - é o valor da potência ativa medida no motor em condições de frequência, tensão, velocidade e carga nominal $H_1 = 4,2$.

Das análises da Tabela I, tendo como base as relações de Rateaux, equações 1, 2 e 3, aplicadas a máquina sob teste, verifica-se que ao variar a carga em 23,8 %, tem-se uma variação de velocidade do motor de 12,6 %, e uma correspondente variação na potência ativa de 29,50 %, portanto, esse é o índice de porcentagem de potência que poderia ser economizada caso se permita aliviar o sistema de 23,8 % de sua carga por uma técnica eficiente de controle da velocidade do motor.

Para a construção da Tabela II, primeiramente o motor de indução foi ligado diretamente a rede a 60 Hz e uma carga eletromagnética, H_i , foi ligada ao eixo do motor, com as bobinas no rotor em curto circuito, a seguir a carga foi variada de 4,2 a 3,2, uma variação de 23,81 %, sendo que a carga de 4,2, representa a carga nominal do motor. Para a condição de carga nominal, $H_1 = 4,2$, a potência ativa medida foi nominada $P_{rede1} = 732,80$ W. A seguir, entre a rede e o motor, foi colocado um inversor de frequências e os procedimentos repetidos para o inversor de frequências a 60 Hz. Para essa condição a potência ativa medida é $P2(ME)_INV\text{-}60$ (W). Nessa tabela η_{1-i} são os resultados percentuais das perdas provocadas pelo inversor funcionando a 60 Hz na alimentação do motor, calculados através da diferença relativa entre a potência do motor, medida com alimentação direta da rede P_{rede-i} (W) e a potência medida com o motor alimentado pelo inversor de frequências a 60 Hz. Foram registrados os fatores de potência FP, as potências reativas, Q (VAR), e aparentes, $S2(INV)$ (VA), as taxas de distorções harmônicas totais, de tensão e corrente, $THD_V(INV)$ (%) e $THD_I(INV)$ (%), respectivamente. Os valores médios, das principais grandezas medidas, foram calculados (MED).

Das análises da Tabela II, observa-se que, a potência ativa média medida nos terminais do motor alimentado pelo inversor de frequência, $P2(ME)_INV\text{-}60$ (W), foi 674,25 W, e a correspondente potência medida sem o inversor foi $P_{rede-MED}$ (W), foi 653,75 W, com uma diferença relativa percentual média de 3,09 %. O fator de potência médio obtido com a utilização do inversor foi, FP= 0,48 e as taxas de distorções harmônicas totais de tensão e corrente, $THD_V(INV)$ (%) e $THD_I(INV)$ (%), respectivamente, foram 1,64 e 185,09. As potências reativas $Q(VAR)$, apresentaram valores relativamente altos e com sinal negativo, os valores altos são

justificado pelo baixo fator de potência e o sinal negativo, como se fosse um reativo capacitivo, o que não seria justificado pelas características do motor utilizado, motor de indução, isso se explica pelo alto índice de distorção harmônica da corrente. A taxa média de distorção harmônica de tensão $THD_V = 1,64$ (%), é considerada baixa, bem abaixo do limite imposto pelas normas que permite até 5,0 %, porém, deve se ter claro que o motor utilizado é de pequeno porte 2,0 cv. Como consequência do baixo fator de potência e das distorções harmônicas de corrente, tem-se uma elevada potência aparente, com valores médios $S2(INV) = 1397,33$ (VA).

Tabela II - Acionamento de uma carga variável através do inversor a 60 Hz e diretamente pela rede e inversor a 60 Hz.

	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	MED
H_i	4,2	4	3,8	3,6	3,4	3,2	
n_0 (rpm)	1682	1690	1695	1704	1709	1717	
P_{rede-i} (W)	732,80	709,40	681,50	631,60	601,60	565,60	653,75
$P2(ME)-INV-60$ (W)	757,80	726,80	685,50	659,70	620,10	595,60	674,25
Q (VAR)	-573,3	380,7	-548,7	-520,7	-497,6	339,6	547,57
$S2(INV)$ (VA)	1537	1497	1419	1368	1296	1267	1397,33
η_{1-i} (%)	3,3	2,4	0,6	4,3	3,0	5,0	3,09
FP	0,494	0,485	0,483	0,482	0,478	0,469	0,48
THD_V (INV) (%)	1,68	1,6	1,67	1,63	1,58	1,65	1,64
THD_I (INV) (%)	177,73	186,08	185,97	183,95	186,87	189,93	185,09

Para a construção da Tabela III, o inversor de frequências foi ligado entre a rede e os terminais do motor de indução com os terminais do rotor em curto circuito, isto é, resistências externa nula. Foram aplicadas as cargas H_i para as correspondentes velocidades n_i , de acordo com as relações de Rateaux, estabelecidas pelas equações 1 e 2 e Tabela I. Para cada condição de velocidade e carga, foram registrados os parâmetros de: potência ativa, $P2(ME)-INV$, potência reativa, Q , potência aparente, S , fator de potência, FP , taxa de distorção percentual total de tensão THD_V e taxa de distorção percentual total de corrente, THD_I , o parâmetro η_{1-i} (%), que correspondem as perdas provocadas pelo inversor, calculadas através dos dados da Tabela I, são repetidos na Tabela II, e compõe a equação (14), que calcula $P2(SIM)-INV$, que são os valores simulados para as relações de Rateaux aplicadas ao inversor de frequências.

$$P2(SIM) - INV = \frac{(100 - \eta_{1-i}(\%))}{100} * (P2(SIM) - Rat) \quad (14)$$

Das análises da Tabela III, observa-se que, as potências ativas medidas nos terminais do motor alimentado pelo inversor de frequência seguindo as relações de Rateaux, para as cargas e velocidades variáveis foram, $P2(ME)-INV$ (W), com valor médio de 646,36 W. As correspondentes potências ativas simuladas para o inversor, através das Relações de Rateaux, foi nominada, $P2(SIM)-INV$, apresentou valor médio de 640,88 W. O erro entre os valores médios de potência ativa medida e simulada, foi de 0,84 %. As potências ativas simuladas pelas relações de Rateaux da Tabela I, $P2(SIM)-Rat$, são repetidos na tabela III e apresenta valor médio de 621,37 W, com erro relativo percentual de 3,04 e 3,86 %, em relação a $P2(SIM)-INV$ e $P2(ME)-INV$, respectivamente. Desses resultados, agora com as frequências e velocidades variadas através do inversor, confirmam o erro médio de cerca de 3,0 %, caso se desconsidere as perdas internas

provocadas no próprio inversor de frequência. O fator de potência médio obtido com a utilização do inversor foi, $FP=0,474$, praticamente não mudou em relação ao que foi obtido na Tabela 1, bem como as taxas de distorções harmônicas totais de tensão e corrente, THD_V (%) e THD_I (%), respectivamente, foram 1,642 e 181,46. As potências reativas, com valor médio $Q(VAR)=-356,94$, apresentaram valores relativamente altos e também com sinal negativo. Como consequência do baixo fator de potência e das distorções harmônicas de corrente, tem se, também nesse caso, uma elevada potência aparente, com valores médios $S2(INV) = 1317,00$ (VA).

Tabela III - Acionamento de velocidade e carga variável através do inversor de frequências de acordo com as simulações das relações de Rateaux

	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	MED
<i>Carga (H_i)</i>	4,2	4	3,8	3,6	3,4	3,2	
n_0 (rpm)	1682	1690	1695	1704	1709	1717	
n_i (rpm)	1682	1649	1612	1578	1538	1500	
η_{1-i} (%)	3,3	2,4	0,6	4,3	3,0	5,0	3,09
$P2(SIM)-Rat$	732,80	689,70	628,28	608,65	552,21	516,60	621,37
$P2(SIM)-INV$	757,80	706,62	631,97	635,73	569,19	544,00	640,88
$P2(ME)-INV$	757,80	697,3	673,1	620,8	579,3	549,7	646,33
Q (VAR)	-573,30	-380,70	-386,40	-353,3	-384,1	-280,2	-356,94
$S2(INV)$ (VA)	1537	1448	1410	1300	1244	1183	1317,00
FP	0,494	0,482	0,478	0,478	0,467	0,465	0,474
THD_V (INV) (%)	1,68	1,57	1,63	1,67	1,66	1,68	1,642
THD_I (INV) (%)	177,73	182,14	179,15	180,58	182,17	183,29	181,46

Para a construção da Tabela IV, os terminais do estator motor de indução foi ligado diretamente a rede em 60 Hz e aos terminais do rotor foram ligadas resistências variáveis. Foram aplicadas as cargas H_i para as correspondentes velocidades n_i , obtidas variando as resistências do rotor, de acordo com as relações de Rateaux, estabelecidas pelas equações 1 e 2 e tabela I. Para cada condição de velocidade e carga, foram registrados os parâmetros de: potência ativa, $P2(RR)-MED$, potência reativa medida pela técnica de variação das resistências do rotor, Q , S , FP , THD_V , THD_I , o parâmetro η_2 (%), correspondem as perdas provocadas pela potência de escorregamento, equação (7). $P2(RR)-SIM$, são os valores simulados para as relações de Rateaux aplicadas ao controle pelas resistências do rotor, foram calculados aplicando-se a equação (15).

$$P2(RR) - SIM = \frac{(100 - \eta_2(\%))}{100} * (P2(SIM) - Rat) \quad (15)$$

Como se pode observar pelas equações (7) e pelos dados de η_2 (%), as perdas crescem a medida que se diminui a velocidade. Para 1500 rpm, as perdas por escorregamento são de 13 %, todavia, observa-se que a diferença relativa percentual entre as potências médias medidas por essa técnica de controle, $P2(RR)-MED$, e a simulada nas condições ideais, proporcionadas pelas Relações de Rateaux, $P2(SIM)-Rat$, foram de 3,9 %, praticamente idênticas as registradas pela técnica de controle por inversores de frequências 3,86 %, calculada pelos dados da Tabela III. A diferença relativa percentual entre os valores médios de $P2(RR)-MED = 646,72$ W e $P2(RR)-$

$SIM = 660,41$ W é de 2,07 %, o que permite avaliar como comprovado a validade do método proposto.

Tabela IV - Acionamento de velocidade e carga variável através do controle das resistências externas do rotor de acordo com as simulações das relações de Rateaux

	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	MED
$Carga (H_i)$	4,2	4	3,8	3,6	3,4	3,2	
$n_0 (rpm)$	1682	1690	1695	1704	1709	1717	
$n_i (rpm)$	1682	1649	1612	1578	1538	1500	
s	0,00	0,02	0,05	0,07	0,10	0,13	
$\eta_2 (\%)$	0	2,0	5,0	7,0	10,0	13,0	6,2
$P2(SIM)-Rat$	732,80	689,70	628,28	608,65	552,21	516,60	621,37
$P2(RR)-SIM$	732,80	706,85	660,63	657,25	613,61	591,33	660,41
$P2(RR)-MED$	732,80	705,00	670,10	619,70	599,40	553,30	646,72
$Q (VAR)$	896,70	901,90	904,20	896,0	893,90	911,10	901,42
$S2(RR) (VA)$	1158	1045	1126	1089	1076	1066	1080,40
FP	0,63	0,62	0,59	0,57	0,56	0,52	0,57
$THD_V (RR) (\%)$	1,6	1,49	1,5	1,56	1,54	1,53	1,524
$THD_I (RR) (\%)$	11,14	9,81	10,57	9,78	11,81	11,56	10,71

A potência ativa média medida pelo controle das resistências do rotor $P2(RR)-MED = 646,72$ W e pelo controle com inversor de frequências $P2(ME)-INV = 646,36$ W, diferem entre si de 0,05 %. A potência aparente média medida pelo controle das resistências do rotor, $S2(RR) = 1080,40$ VA, foi menor 17,96 % do que a potência equivalente medida pelo controle com inversor de frequências, $S2(INV) = 1317,00$ VA.

A taxa de distorção harmônica total de corrente média medida pela técnica de controle pelas resistências $THD_I (RR) (\%) = 10,71$ e pelo controle através do inversor de frequências $THD_I (INV) (\%) = 181,46$, confirmam os conceitos teóricos de que a técnica de controle pelas resistências do rotor não deterioram a qualidade da energia no sistema elétrico.

3. Resultados

A Figura 3(a) apresenta as curvas que permite comparar as potências ativas simuladas e medidas, para as técnicas de controle de velocidade por inversor de frequências e através das resistências do rotor em relação as potências simuladas pelas relações de Rateaux. Verifica-se que as duas técnicas de controle racionaliza a potência elétrica consumida. Para a rotação de 1500 RPM, a potência ativa simulada pelas relações de Rateaux $P2(SI)-Rateaux = 516,60$ W, $P2(RR)-MED = 553,30$ W, $P2(ME)-INV = 549,70$ W, as racionalização das potências foi de 29,50 %, 24,49 % e 27,46 %, respectivamente. A figura 3(b) apresenta as curvas que compara as potências aparentes consumidas nos dois casos. A 1500 RMP, pelo controle de resistências do rotor, $S2(RR) = 1066$ VA e pelo controle através do inversor de frequências $P2(INV) = 1183$ VA a diferença entre elas foi de 9,89 % a maior para o inversor de frequências.

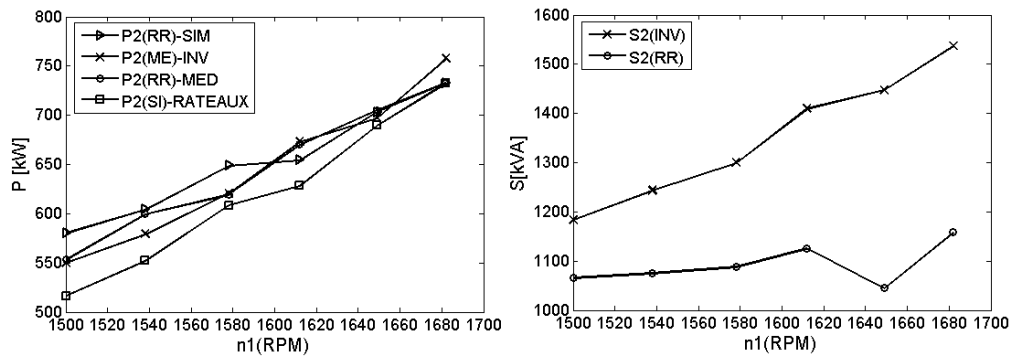


Figura 3: (a)Potência ativa (b) Potência aparente.

A Figura 4(a) apresenta as curvas das taxas de distorções harmônicas de tensão das medições realizadas nos dois modos de controle de velocidade testados e a Figura 4(b) mostra as curvas das distorções de tensão. Observa-se para a velocidade nominal e para as demais velocidades os THD_V não variaram muito, sendo em torno de 1,55 e 1,65, para o controle com resistências do rotor e inversor, respectivamente, a despeito das altas taxas de distorções harmônicas de corrente provocadas pelo inversor, em torno de 181 % e de 10,7 para o controle com resistências do rotor, mostradas na Figura 4(b). Verifica-se que tão diferentes distorções de corrente não criaram proporcionais distorções nos sinais de tensão, isto se explica pela capacidade pequena da fonte distorciva, o inversor é muito pequeno comparado com a potência de curto circuito do alimentador. De acordo com a Tabela I pode se deduzir que a potência de curto circuito do barramento, P_{CC}/P_{CONV} é maior do que 300, pois na referida tabela um THD_I de 113,67 %, teria a capacidade de distorcer um barramento em 3,17 %, caso se tenha a relação $P_{CC}/P_{CONV} = 300$.

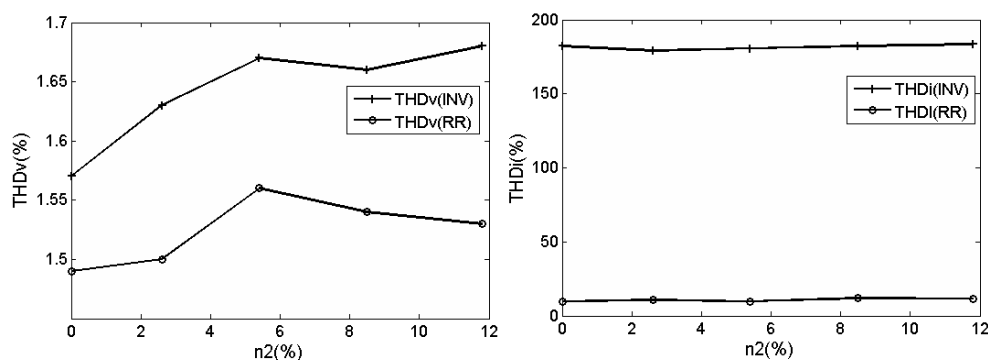


Figura 4: Distorções harmônicas de (a) tensão e (b) corrente.

A Figura 5, apresenta as curvas dos fatores de potências medidos para os dois modos de controle de velocidade. Os valores médios são $FP = 0,47$ e $FP = 0,57$, para o controle com resistências do rotor. Observa-se um fator de potência médio com acionamento a partir do inversor de frequência de dez pontos percentuais menor do que para o controle com resistências do rotor, o que implica, aproximadamente, na mesma diferença nos resultados da potência aparente.

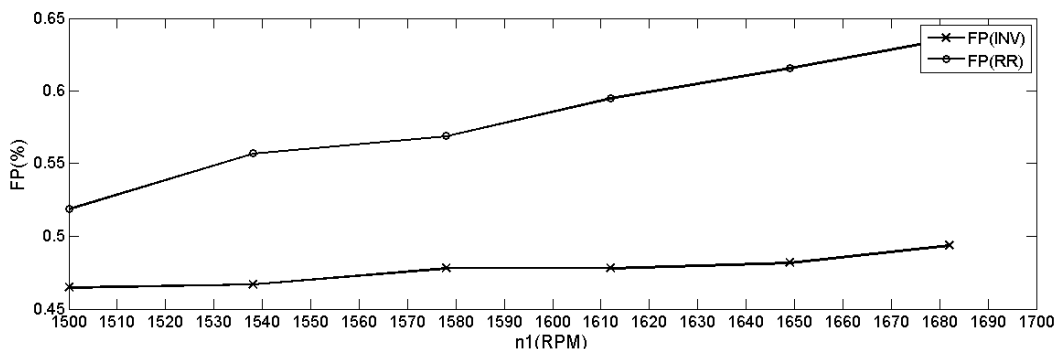


Figura 5: Fatores de potência

4. Conclusões

O trabalho realizado é conclusivo para mostrar que a técnica de controle de velocidade, através das resistências do rotor em motor de indução, do tipo rotor bobinado, pode apresentar substanciais vantagens, em relação ao método mais difundido atualmente, por inversor de frequências, caso se disponha desse tipo de máquina, para operar em regime permanente de trabalho, em sistemas que exijam variações de velocidade abaixo da nominal e em uma faixa relativamente pequena, como seria o caso de aplicação em sistemas de bombeamento para a irrigação, onde a carga é por natureza variável devido ao desnível do terreno. Na irrigação a técnica de controle pelas resistências variáveis do rotor, além de se mostrar efetivamente uma eficiente técnica para racionalizar o consumo de energia ativa, deverá apresentar menor consumo de energia reativa com melhor fator de potência e pequenos distúrbios na qualidade da energia do sistema alimentador.

Sabe-se que os níveis das potências de curto circuito, em barramentos na zona rural, apresentam valores reduzidos, quando comparados aos sistemas mais próximos as fontes ou sub estações de distribuição na rede secundária. O acionamento de grandes motores em sistemas de irrigação a pivô central na zona rural podem chegar à 200 CV. Caso seja realizado o controle, desse nível de potência, através de inversor de frequências, nessas áreas, geralmente de barramento fraco, baixa potência de curto circuito, a distorção de corrente proveniente do inversor poderá provocar distorções nas ondas de tensão de ordem bem maior do que os 5,0 % permitidos nesses casos.

É sabido que a utilização das técnicas de controle eletrônico da velocidade, baseado no controle de frequências, é atualmente indispensável na maior parte dos sistemas industriais, que exigem controle, contudo, são poluidores do sistema elétrico, causando interferências severas, especialmente, em outros sistemas de controle nas proximidades, com desligamento acidental, queima de equipamentos e perdas nas linhas de produção. Bons inversores de frequências podem apresentar performance melhor, do que o utilizado nos testes realizados nesse trabalho, nesses casos utilizam sistemas mais eficientes de filtragem de harmônicos, e conseqüentemente produzem melhor fator de potência, porém, essa qualidade onera o preço, o que faz com que os inversores, nem todos, sejam tão eficientes e o resultado, como se vê, são sistemas cada vez mais poluídos.

Assim como a geração eólica deu sobrevida as, até então, consideradas ultrapassadas máquinas de indução de rotor bobinado, há um campo grande para a utilização eficiente dessas

máquinas, na irrigação com controle eletrônico de velocidade, em malha fechada, das resistências do rotor.

Por fim sabe-se, que no Brasil, essas máquinas são fabricadas, atualmente, para potências muito grandes, acima de 1000 HP, porém, podem ser importadas com valores menores, de indústrias estrangeiras. Entende-se que vale a pena resgatar os estudos para a produção desse tipo de motor, na indústria nacional para faixas menores de potência, pois, se por um lado a construção do motor fica mais cara, do que a de tamanho equivalente, de rotor em gaiola de esquilo, por outro lado o drive de acionamento poderá ser fabricado com preço bem menor do que o do inversor.

REFERÊNCIAS

- [1] Alves, A. J., de Oliveira, L. F., and de Oliveira, A. M. Verificação das relações de rateaux pelo emprego de um inversor de frequência¹. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 6, 3 (2002), 523–525.
- [2] Alves A.J, Oliveira A.M, Oliveira L.F.C. Aplicação de Inversor de Frequência em Acionamento de Bombas em Sistemas de Irrigação a Pivot Central. *COMBEA- Congresso brasileiro de engenharia agrícola Foz do Iguaçu -BRAZIL*, 2001.
- [3] Hanson, B., Weigand, C., and Orloff, S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 122, 3 (1996), 179–182.
- [4] Carvalho D.F. Instalações elevatórias: bombas. *IPUC 355P, Belo Horizonte*, 1977.
- [5] Azevedo Neto J.M, Alvarez G.A. Manual de Hidráulica *Edgar Blucher 335p, São paulo*, 1982.
- [6] Yanagi Jr, T., Ferreira, E., Colombo, A., and Mello, C. d. Método matemático para a estimativa analítica das curvas de desempenho de bombas centrífugas. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, Lavras 21, 4 (1997), 484–490.
- [7] Acionamentos de velocidade variável aplicados a bombas centrífugas. *Reliance Electric Co. Tradução de Racca C. Reliance Eletrica Ltda, pp, 1-8 São Paulo*, Julho 1983.
- [8] José Policarpo G.A., Nery O.Jr., Antonio C.C.P Influência dos Inversores PWM na Qualidade de Energia. *EFEI Itajubá*, 1997.
- [9] Olivio C.N., José C.Oliveira, José J.Vilela, Martins Neto L. Efeitos da qualidade de energia sobre a operação de motores de indução trifásicos *DEE-UFU* , 1998.