

Análise de Partidas de Bombas de Água Alimentadas por Gerador Diesel*

Virna Costa Onofri¹
Elaine Cristina do Carmo²
Victor Flores Mendes³

Resumo

Este estudo apresenta análise de partidas de bombas de água no caso de falta de suprimento de energia elétrica da subestação utilizando um gerador diesel. Serão observados os transitórios de tensão durante as partidas destas bombas, verificando capacidade do sistema gerador diesel atender a demanda necessária de vazão de água para suprir o processo e propor soluções em caso de superação de 15% de queda de tensão. O comportamento do sistema também será analisado com aplicação de cargas. Este estudo foi útil para iniciar um projeto de implantação de geradores diesel para aumentar a segurança operacional da Casa de Bombas.

Palavras-chave: Partida de motores de indução, bombas de água, gerador diesel.

ANALYSIS OF WATER PUMPS START POWERED BY DIESEL GENERATOR

Abstract

This study presents analysis of water pump starters in the event of a lack of electricity supply from the substation using a diesel generator. The voltage transients during the startup of these pumps will be observed, verifying the capacity of the diesel generator system to meet the necessary water flow demand to supply the process and propose solutions in case of exceeding a 15% voltage drop and / or exceeding power of generator. The behavior of the system with load application will also be analyzed. This study was useful to start a project to install diesel generators in order to increase the operation safety in a Pump House.

Keywords: Induction motor start, water pump, diesel generator.

¹ Engenheira Elétrica, Mestre, Engenharia, Gerdau Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil

² Engenheira Elétrica, Mestre, Utilidades, Gerdau Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Elétrica, Doutor, Professor, Departamento Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil..

1 INTRODUÇÃO

Os suprimento de água industrial de uma usina siderúrgica consiste na captação das águas represadas no reservatório de um rio, para seu bombeamento e adução até a Estação de Tratamento de Águas (ETA), ilustradas na Figura 1. Após o tratamento das águas aduzidas, estas seriam conduzidas até a usina para sua utilização posterior, conforme indicado na Figura 2.



Figura 1. Captação de Água e Estação de Tratamento de Águas



Figura 2. Barragem, Captação, ETA e condução da água até a usina

A Estação de Bombeamento é localizada próxima a barragem do rio. Ela possui uma capacidade instalada de $4,5\text{m}^3/\text{s}$, através de 7 moto-bombas (motores elétricos de indução) associados em paralelo, dimensionados da seguinte forma:

- 2 unidades com vazão nominal de $1,0\text{m}^3/\text{s}$ e potência de 1340kW cada;
- 2 unidades com vazão nominal de $0,5\text{m}^3/\text{s}$ e potência de 710kW cada;
- 2 unidades com vazão nominal de $0,25\text{m}^3/\text{s}$ e potência de 330kW cada;
- 1 unidade reserva de emergência de $1,0\text{m}^3/\text{s}$ (motor diesel).

A operação dos 6 conjuntos motobombas fica condicionado ao consumo da usina siderúrgica, cuja vazão média em condições normais de operação é de aproximadamente $0,85\text{m}^3/\text{s}$ de água. A usina siderúrgica em hipótese alguma pode ficar sem abastecimento de água industrial, sob risco de perda do negócio. Por isto, há uma unidade reserva que somente é utilizada em caso de emergência durante falta de alimentação elétrica proveniente da Subestação.

O objetivo deste estudo é dimensionar um sistema com gerador diesel para suprir alimentação elétrica e possibilitar a operação de motobombas suficientes para bombear água para a usina em caso de falta de energia elétrica e problemas no motor diesel de emergência.

Devido ao elevado valor de corrente de partida destes motores, seria necessário especificar vários geradores diesel em paralelo e com altos valores de potência nominal. Para obter uma instalação mais viável financeiramente, opta-se por instalar equipamentos capazes de diminuir a corrente de partida dos motores e então especificar menor quantidade de geradores.

2 SISTEMA ESTUDADO

O sistema escolhido, apresentado na Figura 3, é constituído por 6 bombas acionadas por motores elétricos de indução de 4000V cada, todos com partida direta, alimentados por um painel elétrico de 4,16kV. Este painel de média tensão é

alimentado através de transformadores de 69kV/4,16kV instalados em uma Subestação com uma linha de 69kV em operação.

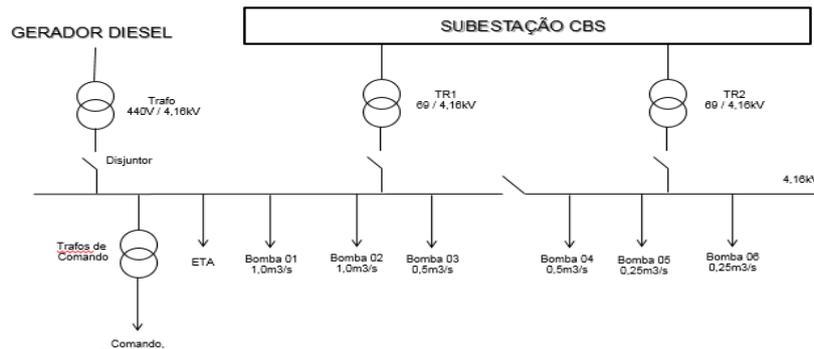


Figura 3. Diagrama unifilar do Sistema estudado

O gerador diesel deve alimentar o painel elétrico de média tensão durante falta de suprimento de energia elétrica da Subestação. Neste momento, os disjuntores secundários dos transformadores TR1 e TR2 e também os disjuntores das 6 bombas estarão desligados, energizando inicialmente apenas os transformadores de comando e a ETA (valores baixos de consumo). Posteriormente deve-se partir os motores de forma a suprir vazão de água suficiente para continuar a operação da usina.

Neste estudo serão observados os transitórios de tensão durante as partidas destas bombas e também verificar a capacidade do sistema gerador diesel atender a demanda necessária em regime permanente. Serão propostas soluções em caso de superação de 15% de queda de tensão e/ou superação dos valores de potências do gerador.

3 ESTADO DA ARTE

Em aplicações cujos geradores alimentam cargas com grande quantidade de harmônicos produzidos pelos inversores de frequência, a forma de onda das correntes não é senoidal, o que ocasiona uma corrente com componentes harmônicas e que pode causar alguns inconvenientes nos geradores e também em seus sistemas, como aquecimento excessivo dos enrolamentos estáticos e das barras de amortecimento devido ao aumento das perdas no cobre; correntes de neutro excessivas, ocasionadas por desbalanceamentos; sobredimensionamento de cabos, proteções, etc [5].

Assim, deve-se elaborar um estudo e realizar um levantamento do teor e conteúdo de harmônicos do sistema a ser atendido pelo gerador, de forma a tomar alguns cuidados na sua especificação. É recomendada a utilização de uma máquina mais robusta, com potência equivalente maior, o que se traduz principalmente em menor reatância e consequentemente valores menores de queda de tensão e aquecimento.

4 SIMULAÇÕES DAS PARTIDAS DIRETAS DAS BOMBAS

Para simular o sistema deste estudo foram utilizados os parâmetros listados abaixo, incluindo algumas considerações:

Gerador Diesel:

Foi considerado com uma fonte de tensão trifásica equilibrada em série com uma impedância. A norma ISO8528 determina tipos diferentes de operação do conjunto moto-gerador diesel. Conforme tabela do fornecedor, o valor de potência nominal

varia em função do regime de operação em que ele trabalha. Abaixo está descrito os valores do conjunto estudado:

- Operação contínua: 1141kW (ou 1450kVA);
- Operação prime (3 horas): 1295kW (ou 1620kVA);
- Operação stand-by (30 min): 1500kW (ou 1875kVA);
- Tensão nominal: 440V
- Impedância subtransitória: $X''d = 12,5\%$

Transformador:

- Potência nominal: 2MVA
- Tensão nominal: 440V
- Impedância: 4%

Motores elétricos:

Os parâmetros dos circuitos equivalente dos motores de indução foram calculados através de ensaios de rotina descrito pela norma NBR 5383 e descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos motores de indução das três bombas

	Motores bombas 1m ³ /s	Motores bombas 0,5m ³ /s	Motores bombas 0,25m ³ /s
Potência nominal	1340kW	710kW	330kW
Tensão nominal	4000V	4000V	4000V
Corrente nominal	224A	118,5A	58A
Veloc. nominal	1190rpm	1188rpm	1785rpm
Conjugado nom.	10750Nm	5710Nm	1765Nm
FP	0.905	0.915	0.885
Rendimento	94%	94%	93%
Inercia	93,75kg.m ²	53,5kg.m ²	11,5kg.m ²
Rs	0.0646Ω	0.1221Ω	0.2137Ω
Lls	2.718mH	5.137mH	10.17mH
Rr	0.2131Ω	0.4854Ω	0.8321Ω
Llr	3.996mH	7.554mH	14.956mH
Lm	127.7mH	278.434mH	382.969mH

Foram realizadas simulações utilizando o software Matlab/Simulink [6], observando a queda de tensão do barramento de 4,16kV, para as seguintes condições de partida direta dos motores com as válvulas das bombas centrífugas fechadas (a vazio):

- Partida direta em $t = 1,0s$ de 1 motor da bomba com vazão nominal de 1,0m³/s;
- Partida direta em $t = 1,0s$ e $t = 8,0s$ de 2 motores das bombas de 0,5m³/s;
- Partida direta de 1 motor da bomba de 0,5m³/s e 2 motores das bombas de 0,25m³/s, em $t = 1,0s$, $t = 5s$ e $t = 10s$;

Cenário 1 – Partida direta de 1 motor de 1340kW:

A Figura 4 ilustra a simulação feita no Simulink para o caso da partida direta de um motor de 1340kW e os resultados estão ilustrados nas Figuras. 5 a 7:

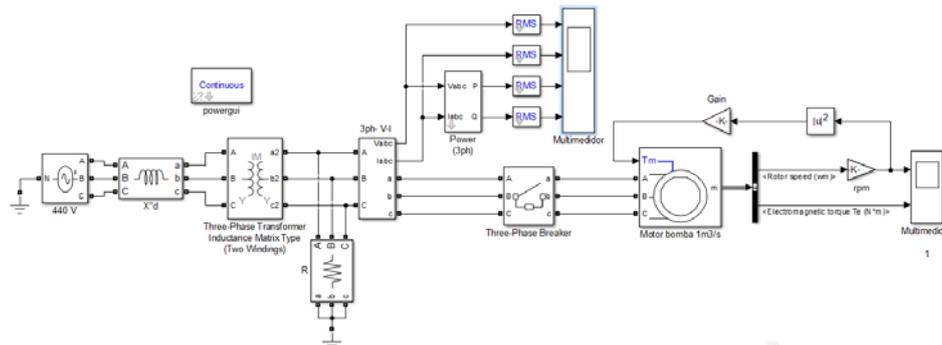


Figura 4. Simulação da partida direta de um motor de 1340kW

Observa-se que a queda de tensão alcançou 43% no barramento de 4,16kV. A potência ativa atingiu um pico de 1400kW durante a partida, entretanto, a potência reativa atingiu pico de 2100kVAr, o que significa potência aparente igual a 2524kVA, ou seja, superior à potência do gerador diesel, tornando inviável esta solução. A corrente de partida atingiu 780A, o que equivale a $I_p/I_n = 3,5$, que é menor do que o esperado para a partida de um motor deste porte. Isto se deve às quedas de tensão sobre as impedâncias do gerador (X''_d) e do transformador ($Z_t\%$).

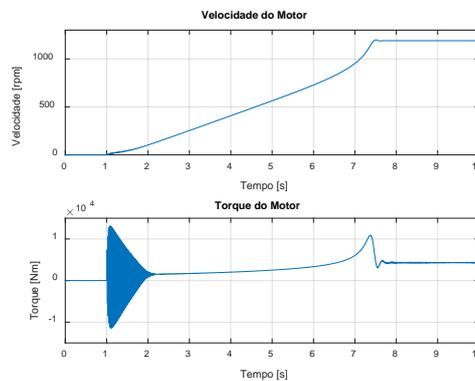


Figura5. Velocidade e torque durante partida de um motor de 1340kW.

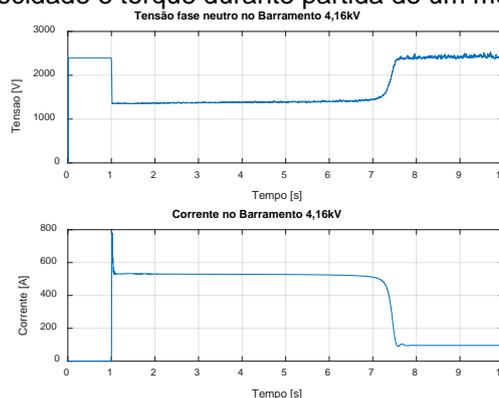


Figura 6. Tensão e corrente no barramento durante partida de um motor de 1340kW – valores RMS

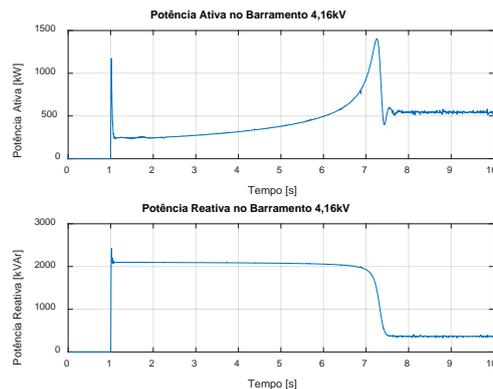


Figura 7. Potência ativa e reativa no barramento durante partida do motor de 1340kW

Cenário 2 – Partida direta de 2 motores de 710kW:

Simulação semelhante a ilustrada na Figura 4 foi realizada, mas agora contemplando partida direta de dois motores de 710kW cada. As Figura 8 a 10 mostram os resultados obtidos, indicando que nesta situação cada motor demorou 3,5 segundos para partir, consumiu um valor máximo de potência ativa e reativa de 1270kW e 1800kVAr, respectivamente, (o que significa potência aparente igual a 2203kVA) e ocasionou uma queda de tensão de 31% no painel 4,16kV durante a partida do segundo motor.

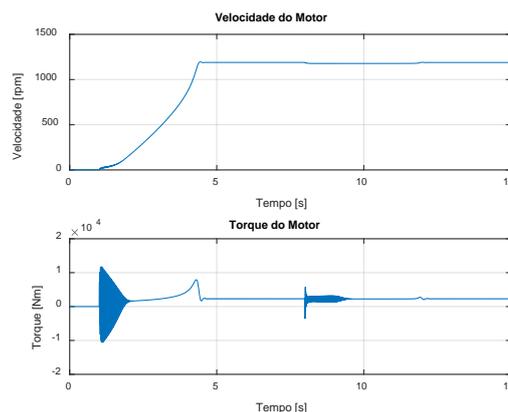


Figura 8. Velocidade e torque durante partida de um dos motores de 710kW

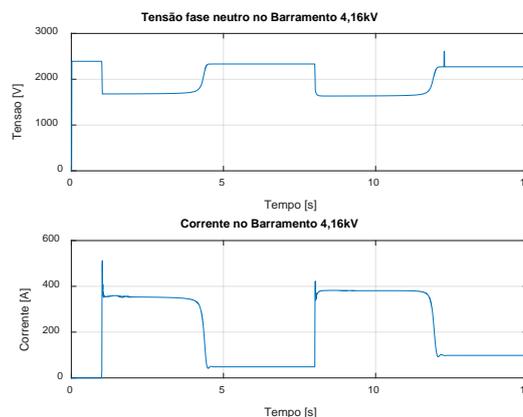


Figura 9. Tensão e corrente no barramento durante partida de 2 motores de 710Kw

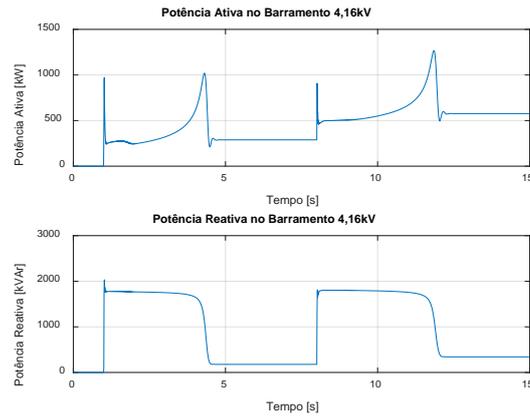


Figura 10. Potência ativa e reativa no barramento durante partida de dois motores de 710kW

Cenário 3 – Partida direta de 1 motor de 710kW e 2 motores de 330kW

As Figura 11 a 13 mostram os resultados obtidos para o cenário de partida direta de 1 motor de 710kW e 2 de 330kW. Observa-se que a queda de tensão máxima é de 29,7% no barramento de 4,16kV. Neste caso, os maiores picos de corrente, e consequentemente os maiores valores de potência ativa, reativa e aparente (1000kW, 1750kVar e 2016kVA), foram determinados pela partida do primeiro motor de 710kW.

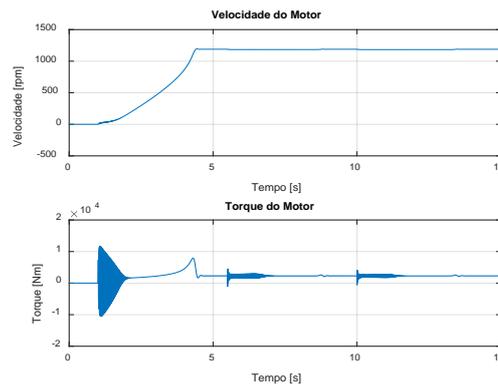


Figura 11. Velocidade e torque durante partida do motor de 710kW

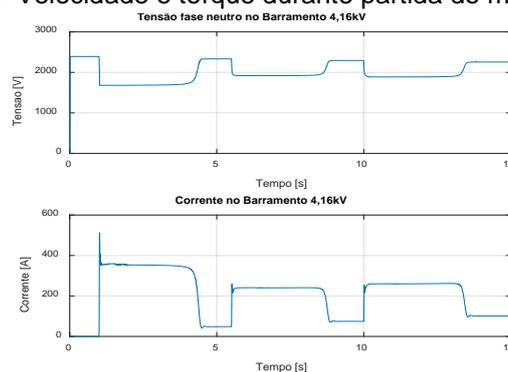


Figura 12. Tensão e corrente no barramento na partida de um motor de 710kW e dois de 330kW

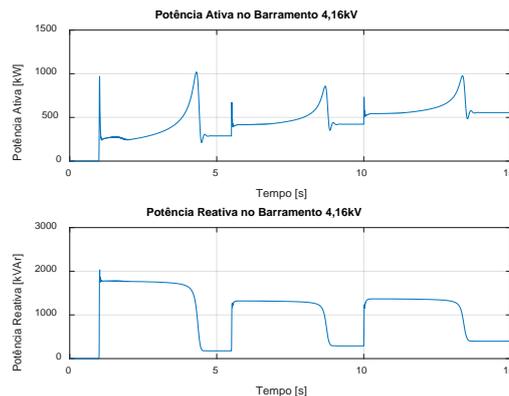


Figura 13. Potência ativa e reativa na partida de um motor de 710kW e dois de 330kW
Como pode ser observado anteriormente, os 3 cenários com partidas diretas de motores ocasionaram queda de tensão superiores a 15% e consumiram valores de potência aparente maiores do que qualquer um dos regimes de operação do gerador existente. Desta forma, deve-se estudar uma maneira de viabilizar a utilização deste gerador diesel de forma a atender o objetivo deste estudo.

5 SIMULAÇÕES DAS PARTIDAS COM INVERSORES DE FREQUENCIA

Uma possível solução seria utilizar inversor de frequência para partir os motores após o barramento de 4,16kV estar alimentado pelo gerador diesel. Entretanto, deve-se atentar para as correntes harmônicas injetadas pelo inversor de frequência. Conforme fabricante de alternadores WEG [5], para a especificação de geradores para alimentação de cargas geradoras de harmônicos, deve-se aplicar um fator de derating na potência do gerador, de forma a preservar o equipamento devido ao acréscimo de temperatura provocada pelos harmônicos, utilizando a curva ilustrada na Figura 14:

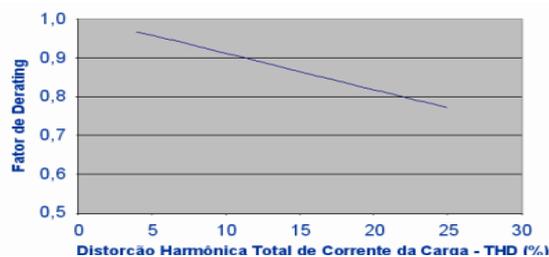


Figura 14. Curva Derating no Gerador x Distorção Harmônica Total da Carga

A potência disponível para um gerador acionar uma carga não linear é dada por (1):

$$S_{disponível} = S_{nom} \cdot Fator_{derating} \quad (1)$$

A topologia de um inversor de frequência, ou seja, o tipo de configuração em que os tiristores do seu módulo retificador, influencia na injeção de corrente harmônica na rede. Assim, a escolha da topologia do inversor de potência é então primordial para obter êxito na solução do problema proposto.

A - Partida do motor 1340kW com inversor de frequência 6 pulsos

Primeiramente foi simulada no Matlab/Simulink a partida do motor de 1340kW utilizando para isto um inversor de frequência de 6 pulsos (Figura 15). Optou-se por utilizar um controle escalar devido a facilidade de implementação do mesmo, o que não trouxe prejuízo às análises. A referência de velocidade é dada por um degrau de 0 a velocidade nominal após 1 segundo. A variação de tensão por frequência

realizou a partida em 3 segundos. Os gráficos de velocidade e torque não serão mais ilustrados, pois as informações relevantes podem ser obtidas dos demais gráficos.

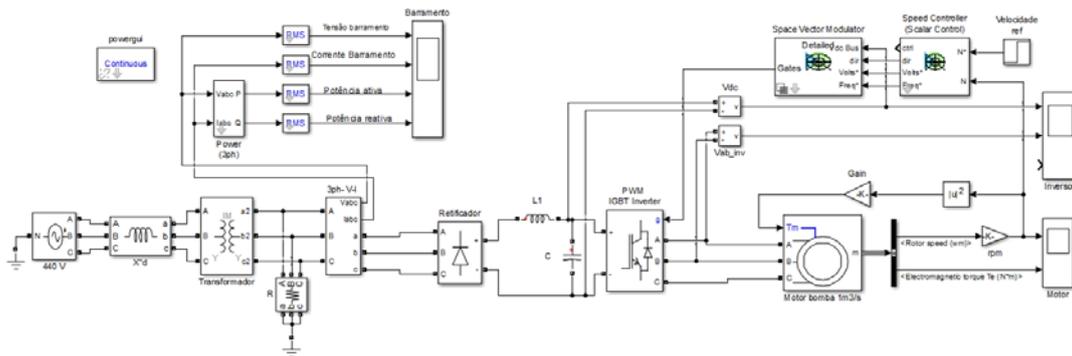


Figura 15. Simulação da partida de um motor de 1340kW com inversor de frequência de 6 pulsos. Conforme Figuras 16 e 17, esta partida do motor provocou queda de tensão de 3,2%, o que atende ao requisito proposto. Entretanto, a corrente no barramento de 4,16kV apresenta THDi = 27,5% devido às harmônicas injetadas pelo retificador, conforme Figura 18. De acordo com a curva da Figura 15, o fator de derating é de aproximadamente 0,75, ou seja, 25% de perda de potência disponível para o gerador acionar a carga.

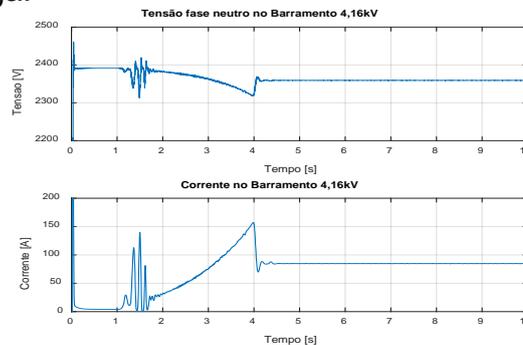


Figura 16. Tensão e corrente na partida do motor de 1340kW com inversor de 6 pulsos

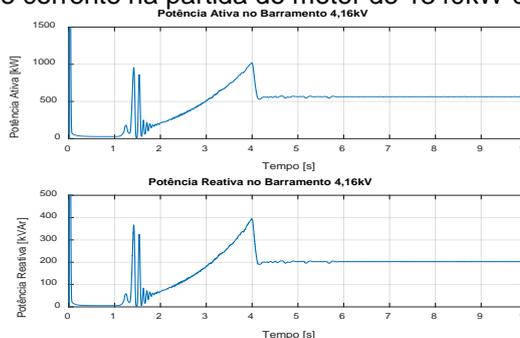


Figura 17. Potência ativa e reativa no barramento durante partida de motor de 1340kW com inversor de frequência de 6 pulsos

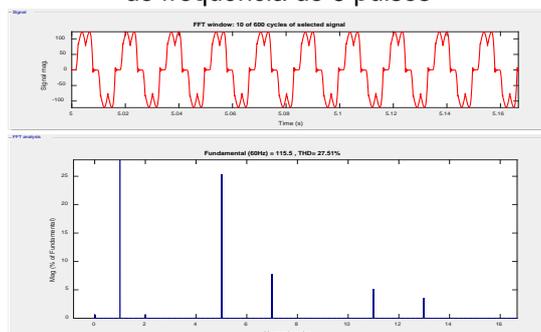


Figura 18. Corrente no barramento durante partida de um motor de 1340kW com inversor de frequência de 6 pulsos

B - Partida de 1 motor de 1340kW com inversor de frequência de 12 pulsos

Com o objetivo de reduzir a injeção de corrente harmônica no barramento de 4,16kV, realizou-se a simulação da partida do motor de 1340kW utilizando agora um inversor de frequência de média tensão de 12 pulsos, conforme Figura 19. Os resultados são apresentados nas Figura 20 a 22.

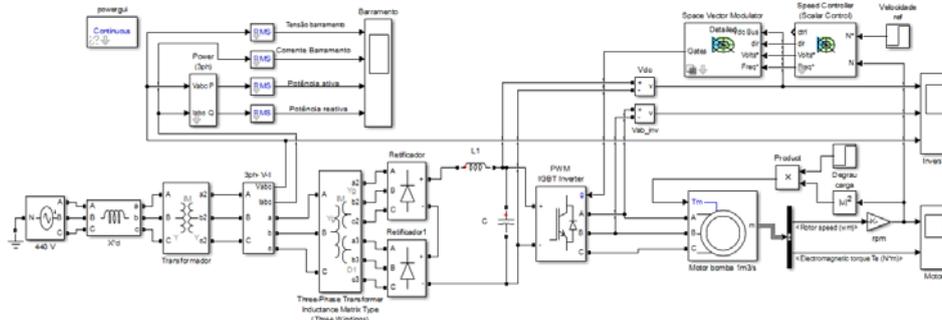


Figura 19. Simulação da partida de um motor de 1340kW com inversor de frequência de 12 pulsos

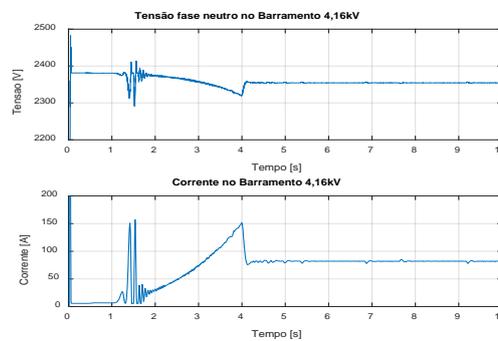


Figura 20. Tensão e corrente no barramento durante partida do motor de 1340kW com inversor de frequência de 12 pulsos

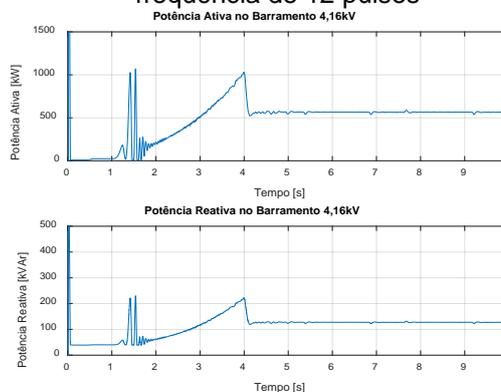


Figura 21. Potência ativa e reativa no barramento durante partida de motor de 1340kW com inversor de frequência de 12 pulsos

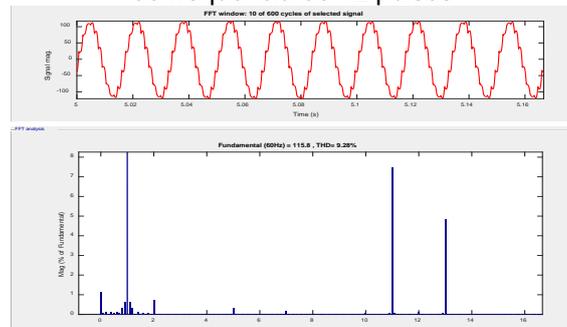


Figura 22. Corrente no barramento durante partida de um motor de 1340kW com inversor de frequência de 12 pulsos

Com esta topologia a corrente no barramento de 4,16kV reduziu seu valor de THDi para 9,3%, o que significa um fator de derating de aproximadamente 0,92. Assim a perda de potência disponível no gerador diminui apenas 8%.

6 SIMULAÇÕES DA OPERAÇÃO DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS COM CARGA

Outro aspecto importante é em relação à capacidade do gerador de suprir energia suficiente para acionar as bombas centrífugas operando com a vazão mínima requerida.

A - Operação da bomba centrífuga com vazão nominal

Foi realizada simulação semelhante a anterior, ou seja, partida do motor de 1340kW via inversor de frequência de 12 pulsos, aplicando-se agora carga nominal (10750Nm) após 6 segundos. Isto significa abrir a válvula totalmente para se obter vazão de 1m³/s após finalizada a partida. Nesta simulação é aplicada referência de 1190rpm e não há variação de velocidade.

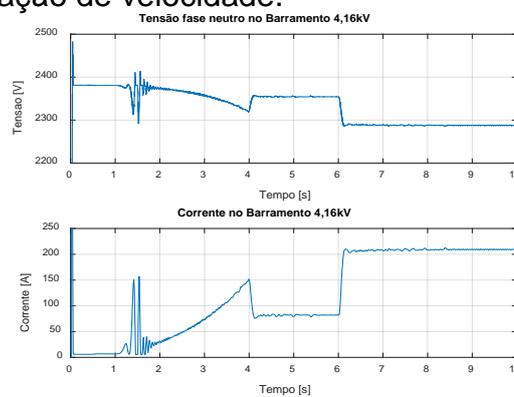


Figura 23. Tensão e corrente no barramento com carga nominal de 1340kW

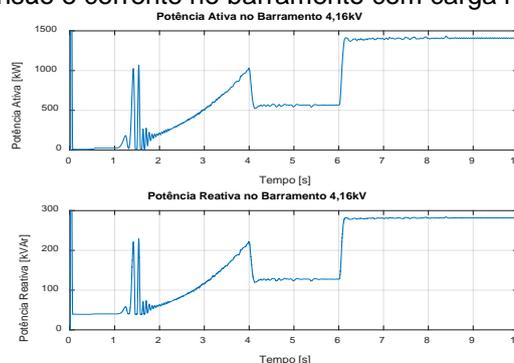


Figura 24. Potência ativa e reativa no barramento com carga nominal 1340kW

Conforme visto anteriormente, esta topologia injeta corrente harmônica no barramento com THDi igual a 9,3%, ocasionando perda de potência disponível no gerador de 8%. Entretanto o resultado da simulação apresentado nos gráficos das Figuras. 23 e 24 ilustram que a potência ativa requerida foi de 1427kW, que é maior do que a capacidade do gerador mesmo operando em regime de stand-by.

B - Operação da bomba centrífuga com vazão 0,85m³/s

Uma maneira de conseguir suprir a necessidade do processo utilizando este mesmo gerador seria bombear água a uma vazão de 0,85m³/s. Para isto, utiliza-se o inversor de frequência para diminuir a velocidade do motor e conseqüentemente a vazão da bomba. De acordo com [7], a operação de bombas centrífugas em velocidade variável obedece ao princípio da semelhança. Neste caso, as leis que

governam as relações entre a velocidade, n , a vazão, Q , a altura manométrica, H , e a potência hidráulica, P . podem ser expressas por (2), (3), (4):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (3)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (4)$$

onde os subscritos 1 e 2 referem-se às condições inicial e final.

Assim, foi realizada a mesma simulação, mas agora em outro ponto de operação: $Q_2 = 0,85\text{m}^3/\text{s}$; $N_2 = 1011,5\text{rpm}$; $P_2 = 823\text{kW}$; $T_2 = 7775\text{Nm}$.

Os resultados desta simulação nas Figuras. 25e26 demonstram que a queda de tensão diminuiu para 2,0% após aplicação da carga e a potência ativa requerida passou para 860kW, atendendo então à todos os requisitos.

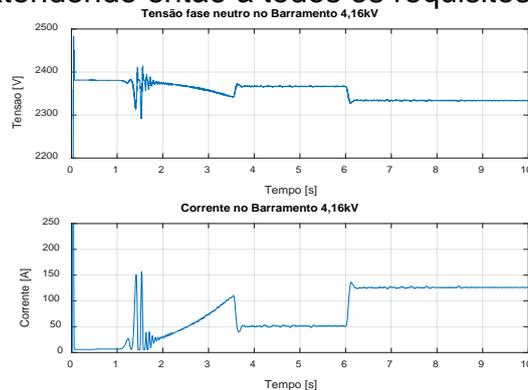


Figura 25. Tensão e corrente no barramento com carga $0,85\text{m}^3/\text{s}$

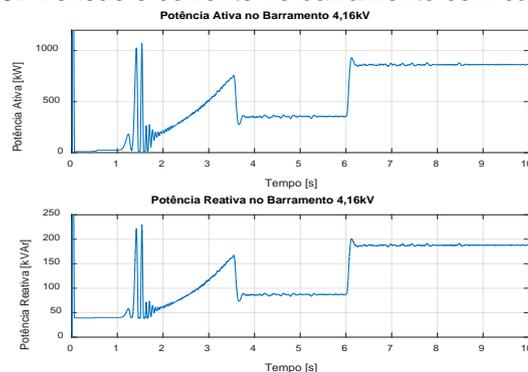


Figura 26. Potência ativa e reativa com carga $0,85\text{m}^3/\text{s}$ no motor de 1340kW

7 CONCLUSÕES

Foram realizadas várias simulações para viabilizar a utilização de um gerador diesel para suprir energia elétrica em uma Casa de Bombas para obter vazão de água suficiente em caso de falha da subestação. A Tabela 2 resume os resultados.

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos

TIPO DE PARTIDA	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	FP	ΔV	THDi
Direta com motor 1340kW	1400	2100	2524	0,55	43%	-
Direta com 2 motores 710kW	1270	1800	2203	0,58	31%	-
Direta motor 710kW e 2 de 330kW	1000	1750	2016	0,5	29,7%	-
Inversor 6 pulsos com motor 1340kW	1000	400	1077	0,93	3,2%	27,5%
Inversor 12 pulsos motor 1340kW	1000	220	1024	0,98	2,8%	9,3%
Inversor 12 pulsos com motor 1340kW carga $1\text{m}^3/\text{s}$	1400	280	1428	0,98	3,8%	9,3%
Inversor 12 pulsos com motor 1340kW carga $0,85\text{m}^3/\text{s}$	760	165	778	0,98	2,0%	9,3%

Percebe-se que a partida direta em três cenários diferentes não permite a utilização do gerador diesel. A utilização de um inversor de frequência se torna então uma opção para minimizar os picos de partida, mas a topologia de 6 pulsos injeta altos valores de corrente harmônica, diminuindo a potência disponível do gerador. Opta-se então pela utilização da topologia 12 pulsos, o que reduz bastante o THDi. Posteriormente analisou-se o comportamento do sistema com a aplicação de carga. Concluiu-se que utilizar o inversor de frequência para reduzir a carga para uma vazão de $0,85\text{m}^3/\text{s}$ atenderia a todos os requisitos técnicos para operação do sistema.

REFERÊNCIAS

- 1 KRAUSE, P.C. "Analysis of Electrical Machinery", McGraw-Hill, Inc, New York, 1986.
- 2 NOVOTNY, D. W. and LIPO., T. A. "Vector Control and Dynamics of AC Drives". Oxford University Press, 1996.
- 3 FITZGERALD, A. E; KINGSLEY Jr, C.– "Máquinas Elétricas"- Mc Graw Hill, 1975.
- 4 KOSOV, I.L., 1972 "Máquinas Elétricas e Transformadores", 13 ed., São Paulo, SP, Brasil, Editora Globo.
- 5 "Curso DT-5 – Características e especificações de geradores", Treinamento WEG <<http://www.weg.net/>>.
- 6 ONG, C.M. "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB/Simulink", Prentice Hall PTR, 1997
- 7 MESQUITA, A. L., SILVA, L. J. S., JUNIOR, O. A., PEREIRA, J. A. R, SILVA, A. C. P. "Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para redução do consume de energia". VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água João Pessoa (Brasil), 2006.
- 8 ISO8528, "Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets".