



## Capacidade de produção e consumo específico de energia em picadoras forrageiras tipo desintegrador/picador/moedor

**Luiz H. de Souza<sup>1</sup>, Luciano B. Vieira<sup>2</sup>, Gutemberg P. Dias<sup>2</sup> & Adair J. Regazzi<sup>2</sup>**

### RESUMO

Avaliaram-se a capacidade de produção e o consumo específico de energia em picadoras de forragem tipo Desintegrador/Picador/Moedor no processamento de capim-elefante considerando-se, como tratamentos, três picadoras (DPM-1, DPM-2 e DPM-4), cinco diferentes rotações, três ângulos oblíquos das facas e dois ângulos do gume das facas. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com duas repetições e os resultados avaliados por meio da análise de regressão. O ângulo oblíquo de 10° propiciou, aos três DPMS, maior eficiência e, em algumas situações o ângulo oblíquo de 38° proporcionou melhor desempenho aos DPMS 1 e 2; enquanto em outras, o ângulo de 30° proporcionou ao DPM-4, melhor desempenho. É possível baixar o custo de produção quando se trabalha em menores rotações, em virtude do valor do consumo específico ser reduzido. Embora o DPM-4 tenha apresentado menor demanda energética, ressalta-se que esta máquina possui maior preço de aquisição que os outros dois modelos e maior dificuldade de alimentação, obrigando o produtor a contratar mais uma pessoa para executar este processo.

**Palavras-chave:** máquinas agrícolas, demanda energética, eficiência energética

## Production capacity and specific energy consumption in forage choppers of the disintegrator/chopper/grinder type

### ABSTRACT

The production capacity and specific energy consumption in forage choppers type Disintegrator/Chopper/Grinder for elephant grass processing were evaluated. The treatments consisted of the combination of three forage choppers (DPM-1, DPM-2 and DPM-4), each operating in five different rotations, three oblique angles of the knives and two angles of the knives' edges. The experimental design used was completely randomized with two repetitions, and the results were evaluated by means of the regression analysis. The oblique angle of 10° led to greater efficiency for the three DPMS. In some situations, the oblique angle of 38° provided better performance for DPMS 1 and 2, while in others, the angle of 30° provided better performance for DPM-4. It is possible to lower production costs, when working at lower rotation speeds, due to the specific consumption being reduced. Although the DPM-4 has presented a lower energy demand, it is worth pointing out that this machine is more expensive than the other two models and presents greater difficulty in feeding, forcing the farmer to employ an extra person to execute this process.

**Key words:** agricultural machines, energy demand, energy efficiency

<sup>1</sup> UNIMONTES, CEP 39440-000, Janaúba, MG. Fone: (38) 3821-2756. E-mail: [luiz.souza@unimontes.br](mailto:luiz.souza@unimontes.br)

<sup>2</sup> UFV, CEP 36570-000, Viçosa, MG. E-mail: [lbaiao@ufv.br](mailto:lbaiao@ufv.br); [gpdias@ufv.br](mailto:gpdias@ufv.br); [adairreg@ufv.br](mailto:adairreg@ufv.br)

## INTRODUÇÃO

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) é uma das espécies forrageiras tropicais mais importante na alimentação do rebanho bovino no período da seca em função do seu elevado potencial de produção de matéria seca (MS), aceitabilidade e qualidade (Pereira et al., 2000b). É versátil tanto na forma natural (picado ou pastejo), como conservado (Silva et al., 1996).

Como o clima não permite a produção contínua de alimentos para os animais durante toda a época do ano, torna-se necessário providenciá-los no período de menor oferta; assim, máquinas específicas são usadas para cortar e picar o capim (Silva et al., 2003).

Cita-se, dentre as principais máquinas, o Desintegrador/Picador/Moedor (DPM), que pode ser acionado por motores estacionários (elétricos, de combustão interna diesel ou gasolina), por intermédio de correias, polias ou, ainda, por trações via Tomada de Potência (TDP).

Grande parcela dos fabricantes dessas máquinas constitui-se de pequenas fábricas sem setor de pesquisa nas quais os equipamentos fabricados e comercializados nem sempre funcionam no seu ponto ótimo; desta forma, o esforço com vista a induzir a avaliação do desempenho operacional dessas máquinas, a fim de otimizar a eficiência energética, é válido. De acordo com CEPEL (2000), não existem normas específicas para esses ensaios.

Em 17 de outubro de 2001 foi sancionada a lei nº 10295, que prevê, em seu artigo 2º, a criação de “níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia” (MME, 2002) que define a relação de equipamentos que devem atender aos requisitos mínimos de eficiência e incluiu, entre eles, o DPM.

Atualmente, existe o Selo Procel de Economia de Energia (em parceria com o INMETRO) concedido aos equipamentos elétricos que apresentam melhor eficiência energética; sua finalidade é estimular a fabricação nacional de equipamentos elétricos mais eficientes e orientar o consumidor a adquirir equipamentos que apresentem melhores níveis de eficiência energética.

Persson (1987) afirma que a quantidade de energia consumida para fragmentar material vegetal pode depender de diversos fatores, quais sejam: taxa de alimentação, comprimento dos fragmentos, velocidade das facas, largura de corte, ângulo de afiação das facas, tipo de facas e possíveis interações entre eles.

Bianchini (2002) montou uma bancada de ensaio com a função de picar palha de cana utilizando três ângulos de 0, 5 e 10° e concluiu que é benéfica a existência do ângulo oblíquo em ferramentas para corte de palha de cana-de-açúcar, do ponto de vista da força requerida para o corte e, conseqüentemente, da potência instantânea exigida.

O autor explica que este ângulo, formado pela borda cortante da lâmina e a linha paralela à superfície do material a ser cortado, reduz a força específica máxima de corte haja vista que provoca um corte progressivo e contínuo, ao contrário da lâmina reta, que produz um corte abrupto do material.

Quando a lâmina apresenta ângulo oblíquo, a parte mais avançada inicia o corte antes da parte mais retraída, de forma que o pico da sollicitação de força fica atenuado. Esta atenuação será, dentro de certos limites, tão maior quanto maior for o ângulo oblíquo da lâmina.

Visvanathan et al. (1996) avaliaram o efeito dos ângulos do gume da faca e sua velocidade sobre a energia específica de corte ( $\text{kJ m}^{-2}$ ) de tubérculos de “cassava” por intermédio de um pêndulo de impacto direto utilizando 4 diferentes ângulos do gume das facas (15, 30, 45 e 60°) e obtiveram uma curva de energia específica de corte que decrescia até o intervalo de 30 a 45°, voltando a aumentar a partir deste, sendo o valor ótimo encontrado no ângulo de 37°.

Alguns autores que trabalharam com desempenho de equipamentos eletrotrituradores, concluíram que a rotação que fornece melhores resultados nem sempre era aquela recomendada pelo fabricante, como é o caso de Pereira et al. (2000a) e Rodrigues (2000) que trabalharam com o desempenho e produção específica de picadoras e ensiladoras de forragem e o desempenho de Desintegradores/Picadores/Moedores (DPM), na moagem do milho, respectivamente.

A melhoria da demanda energética das várias máquinas agrícolas envolvidas no corte de material vegetal, torna-se necessária, do ponto de vista tecnológico; assim sendo, se objetivou, neste trabalho, avaliar a capacidade de produção e o consumo específico de energia de três picadoras (DPM-1, DPM-2 e DPM-4) no processamento do capim-elefante.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio de Equipamentos Eletrotrituradores do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, instituição conveniada com a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), parceira no empreendimento, e nas dependências do Centro Tecnológico de Desenvolvimento Regional de Viçosa (CENTEV).

Utilizou-se o capim-elefante em estágio avançado de desenvolvimento, com umidade de 60% nos talos e nas folhas determinada após o processamento e homogeneização das amostras. De cada amostra se retirou uma subamostra padronizada de 300 g, que foi embalada em filme plástico para evitar perda de umidade e, posteriormente, acondicionada em papel permeável para secagem em estufa com ar quente circulante e temperatura entre 65 a 70 °C, por um período aproximado de 72 h.

Para condução dos testes três máquinas novas, denominadas Desintegrador/Picador/Moedor (DPM) foram adquiridas no mercado e caracterizadas de acordo com a Tabela 1.

Os tratamentos foram constituídos pela combinação de três DPMs, cada um operando em cinco diferentes rotações, três ângulos oblíquos das facas e dois ângulos do gume das facas.

As rotações das máquinas foram avaliadas de acordo com a faixa estipulada pelo fabricante, sendo duas acima e duas abaixo da recomendada (5330, 4715, 4100, 3565 e 3154 rpm para o DPM-1; 4810, 4255, 3700, 3217 e 2846 rpm para o DPM-2 e 4290, 3795, 3300, 2870 e 2538 rpm para o DPM-4)

**Tabela 1.** Características técnicas das máquinas, segundo prospecto do fabricante

Picadora	Potência		Faca Nº	Rotação rpm	Produção* kg h <sup>-1</sup>
	cv	kW			
DPM-1	5,0-7,5	3,7-5,5	2	4100	1000/2000
DPM-2	7,5-10,0	5,5-7,4	2	3700	2000/3000
DPM-4	10,0-12,5	7,4-9,2	2	3300	3000/4000

\* Raízes, tubérculos, capim e cana-de-açúcar

e controladas por intermédio de um inversor de frequência, Vectrue Inverter, modelo CFW 09/WEG. As rotações foram escolhidas considerando-se duas (13 e 23%) menores que a nominal e duas (15 e 30%) maiores que esta. O inversor de frequência era regulado até que as rotações, acima mencionadas, atingissem o valor estipulado; este valor era verificado com o auxílio de um medidor de rotação colocado no eixo da picadora. Utilizou-se, para o acionamento das máquinas, um motor elétrico de 20 cv (14,7 kW).

Modificações foram feitas nas características das máquinas para avaliar a influência dos ângulos oblíquos e do gume das facas. Utilizaram-se três ângulos oblíquos (-10, 0 e 10°), orientados segundo a linha vertical que corta o eixo da máquina e dois ângulos do gume das facas (30 e 38°).

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado com duas repetições e os dados foram submetidos a análise de variância da regressão em que, para cada máquina, o modelo estatístico completo foi:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 n_i + \beta_2 F_i + \beta_3 G_i + \beta_4 n_i^2 + \beta_5 F_i^2 + \beta_6 n_i F_i + \beta_7 n_i G_i + \beta_8 F_i G_i + \epsilon_i \quad (1)$$

em que:

- $Y_i$  – variáveis de resposta, capacidade de produção, t h<sup>-1</sup>, e consumo específico de energia, kWh t<sup>-1</sup>
- $n$  – rotação, rpm
- $F$  – ângulo oblíquo das facas, °
- $G$  – ângulo do gume das facas, °
- $\beta_j$  – parâmetros a serem estimados, com  $j = 0, 1, 2, \dots, 8$
- $\epsilon_i$  – erro aleatório suposto normal e independentemente distribuído com média zero e variância  $\sigma^2$

A partir do modelo completo (Eq. 1), escolheu-se aquele que melhor se ajustou, com base nos seguintes critérios estatísticos: falta de ajustamento não significativo; regressão significativa; significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t; coeficiente de determinação ajustado e análise de resíduos.

Adotou-se, nos testes estatísticos, um nível de significância de até 15% de probabilidade. Para facilitar a discussão e interpretação dos resultados sobre a capacidade de produção e consumo específico de energia em função da rotação, ângulo oblíquo das facas e ângulo do gume das facas a partir das equações de regressão, foram feitos cortes nas superfícies de resposta ajustadas.

É importante ressaltar que, do ponto de vista estatístico, quando se inclui um termo quadrático no modelo de regressão e este é significativo, em geral o termo linear deve permanecer no modelo, mesmo sendo não significativo; entre-

tanto, em algumas equações ajustadas nesse estudo, tal procedimento não foi seguido visto que provocava sérios problemas de multicolinearidade, tornando os coeficientes de regressão não significativos.

Para avaliar a capacidade de produção foram colocadas, próximo à saída de cada máquina, duas lonas esticadas no chão, uma sobre a outra, para que a coleta de dados pudesse ser executada em regime nominal. A lona que primeiro recebeu o produto foi dobrada para trás, no momento em que se acionou o cronômetro, deixando-se a lona que estava por baixo exposta, a fim de que esta recebesse o produto picado após a máquina entrar em regime nominal; após 5 min de processamento do capim, a lona superior voltou à posição original, impedindo o material cortado de cair sobre a lona inferior; depois do desligamento da máquina, o capim picado, sobre a lona de baixo, foi coletado em baldes e sua massa foi medida para avaliação da capacidade de produção da máquina. Utilizou-se uma balança da marca Filizola, modelo 160, com capacidade de até 500 kg e resolução de 0,1 kg.

Para manter a taxa de alimentação constante foram colocadas mais duas pessoas próximas à boca da moega preparando os feixes de capim, com o objetivo de garantir alimentação contínua da máquina, durante todo o tempo.

A capacidade de produção foi avaliada conforme Eq. 2:

$$C_p = \frac{M}{t} \quad (2)$$

em que:

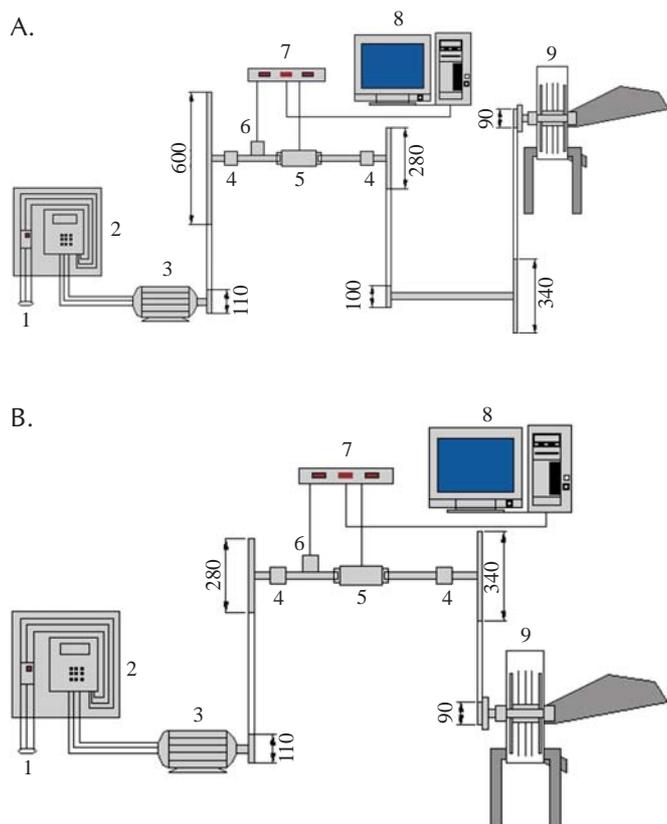
- $C_p$  – capacidade de produção, t h<sup>-1</sup>
- $M$  – massa do capim picado, t
- $t$  – tempo de processamento, h

Avaliou-se o consumo específico de energia mensurando-se o torque e a rotação de operação das máquinas, em que o torque foi medido com o auxílio de um torquímetro da marca Ômega Engineering, INC, modelo TQ 501-2k, giro máximo de 6000 rpm, com capacidade de 226 mN, erro de  $\pm 0,18\%$  de fundo de escala e taxa de saída de 2 mV V<sup>-1</sup> nominal de alimentação e a rotação o foi com o auxílio de um sensor magnético construído no Laboratório de Máquinas Agrícolas/DEA/UFV, com resolução de uma revolução, posicionado no eixo do torquímetro.

Utilizou-se um sistema de aquisição de dados da HBM modelo “Spider 8”, que utiliza o programa “Catman v. 1.2”, para seu controle, o qual possibilita a visualização gráfica instantânea dos dados e o seu armazenamento em mídia eletrônica. O sistema de aquisição envia os dados a um microcomputador para a visualização gráfica instantânea dos dados. As bancadas de ensaio foram montadas de acordo com Dias et al. (1998) e conforme a Figura 1A e 1B.

Desta forma, procedeu-se à relação de transmissão para os DPMs 1 e 2, com o intuito de se reduzir a rotação na árvore intermediária na qual estava acoplado o torquímetro, com o objetivo de que o torque medido se encontrasse em um valor tal que permitisse, no máximo, um erro de 1% nas medidas efetuadas pelo torquímetro.

Para o DPM-4, porém, como a sua rotação nominal é



1. Rede elétrica
  2. Inversor de frequência
  3. Motor
  4. Mancais
  5. Torquímetro
  6. Sensor de rotação
  7. Aquisição de dados
  8. Computador
  9. DPM
- \* Diâmetro das polias em milímetro

**Figura 1.** Esquema da bancada de ensaios para os DPMs 1 e 2 (A) e DPM-4 (B)

inferior à dos outros dois modelos, o eixo intermediário entre a árvore do torquímetro e a máquina, foi eliminado (Figura 1B).

Devido à variabilidade de carga que alimenta a máquina e à desuniformidade da densidade do material, os valores referentes ao torque solicitado variam bastante, fenômeno este que dificulta a análise da energia consumida pela máquina. Por mais que se tenha tentado manter a taxa de alimentação constante, isto não foi possível devido à grande dificuldade de uniformização da densidade de capim.

Considerando-se que o torque representa os momentos de alimentação da máquina, fez-se uma “estimativa” da provável capacidade de produção, selecionando-se o torque máximo e se procedendo à eliminação dos valores de torque inferiores aos correspondentes a 50% do torque máximo e à não alimentação da máquina; calculou-se o tempo em que havia abastecimento efetivo da máquina e se estimou a capacidade de produção com base no produto processado no tempo no qual realmente havia alimentação de capim.

O consumo específico de energia ( $\text{kWh t}^{-1}$ ) foi avaliado relacionando-se o torque ( $\text{mN}$ ) e a rotação com a capaci-

dade de produção ( $\text{t h}^{-1}$ ):

$$C_e = \frac{T \times n \times k}{C_p} \quad (3)$$

em que:

$C_e$  – consumo específico,  $\text{kWh t}^{-1}$

$T$  – torque,  $\text{mN}$

$n$  – rotação,  $\text{rpm}$

$C_p$  – capacidade de produção da máquina,  $\text{t h}^{-1}$

$k$  –  $1,0472 \times 10^{-4}$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Capacidade de produção

Percebe-se, por intermédio das Figuras 2A, 2B e 2C, aumento da capacidade de produção com o incremento da rotação, haja vista a sucção do material e o maior número de vezes com que as facas irão passar pela contra-faca em um intervalo de tempo determinado aumentando, desta forma, a quantidade de produto picado.

Os maiores valores de capacidade de produção foram encontrados ao se utilizar as facas com ângulo oblíquo de  $10^\circ$ ; a presença deste ângulo proporcionou, às facas, maior tração sobre a massa de capim a ser picado, o que fez com que o capim sofresse uma sucção para dentro da máquina e maior quantidade do produto fosse picada por unidade de tempo.

Com relação ao ângulo do gume da faca, ocorreu uma indefinição quanto à capacidade de produção visto que os valores se intercalaram, mas para os DPMs 1 e 2, a faca com ângulo de  $38^\circ$  obteve maior capacidade de produção; já para o DPM-4 foi a faca de  $30^\circ$ .

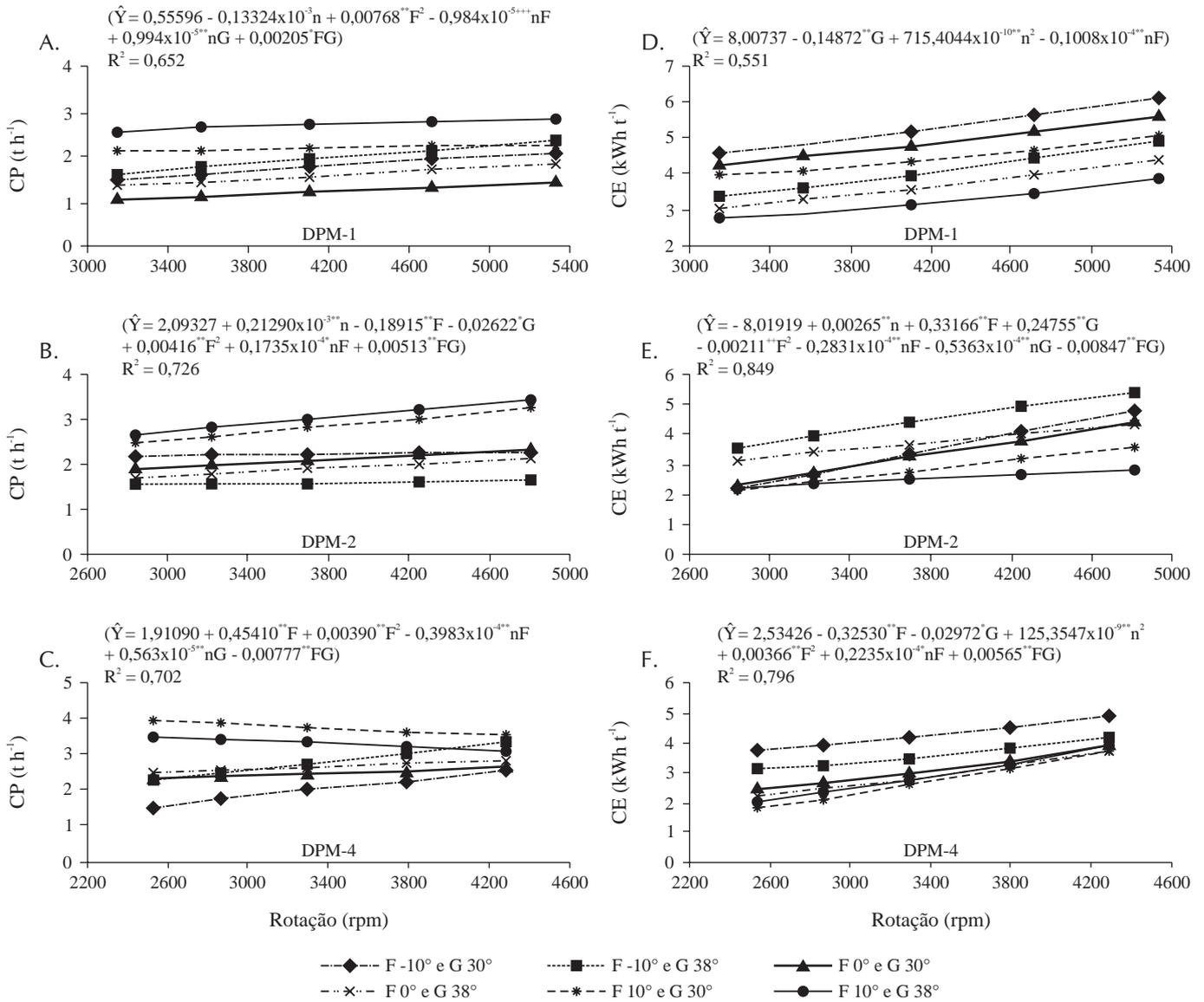
Quanto à capacidade de produção indicada pelo fabricante, o DPM-1 atingiu o especificado ( $1000$  a  $2000 \text{ kg h}^{-1}$ ). Os DPMs 2 e 4, porém, somente o atingiram ao se utilizar ângulo oblíquo de  $10^\circ$  nas condições de  $30^\circ$  e  $38^\circ$  de ângulo do gume.

### Consumo específico

Observa-se, por intermédio das Figuras 2D, 2E e 2F, menor demanda energética em rotações abaixo daquelas indicadas pelo fabricante, o que está de acordo com Pereira et al. (2000a) e Rodrigues (2000).

O ângulo oblíquo de  $10^\circ$  propiciou, aos três DPMs, menor demanda energética, independentemente do ângulo do gume utilizado, corroborando com as afirmações de Bianchini (2002); já a faca de  $-10^\circ$  apresentou maior consumo específico que a de  $0^\circ$ , que pode ser explicado pelo fato de que a faca de  $-10^\circ$  provocou maior concentração do produto vegetal na extremidade final da faca (devido ao deslizamento) aumentando, desta forma, a força, para cortar o material.

Dentre os ângulos do gume avaliados em algumas situações, o ângulo de  $38^\circ$  proporcionou melhor desempenho aos DPMs 1 e 2; em outras, o de  $30^\circ$  ao DPM-4; assim, os ângulos do gume utilizados serviram para se concluir que esta variável influencia diretamente na demanda energética das máquinas que envolvem corte de material vegetal,



\*\* , \* , \*\* e \*\*\* Significativo a 1, 5, 10 e 15% de probabilidade respectivamente, pelo teste t

**Figura 2.** Equações de regressão ajustadas para capacidade de produção e consumo específico de energia dos DPMs 1, 2 e 4, em função da rotação (n), ângulo oblíquo das facas (F) e ângulo do gume das facas (G)

porém se necessita de uma variação maior deste parâmetro para se avaliar até quando ele poderá ser utilizado como referência, pois os valores variaram de máquina para máquina. Visvanathan et al. (1996), observou a existência de um valor mínimo de energia específica que diminui e volta a aumentar, de acordo com o incremento do ângulo do gume das facas.

Embora o DPM-4 tenha apresentado maior capacidade de produção, menor consumo específico e, conseqüentemente, menor custo de produção, ressalta-se que esta máquina apresenta maior preço de aquisição que os outros dois modelos e maior dificuldade de alimentação, obrigando o produtor a contratar mais uma pessoa para executar este processo, com o intuito de que a máquina possa trabalhar com fluxo constante e, desta forma, não haver queda da demanda energética.

**CONCLUSÕES**

1. As maiores capacidades de produção e menores consumos específicos foram proporcionados pelas facas de 10° de ângulo oblíquo.
2. Dentre os ângulos do gume avaliados o ângulo de 38° proporcionou melhor desempenho aos DPMs 1 e 2; enquanto em outras, o ângulo de 30° proporcionou ao DPM-4.
3. Apesar das maiores rotações propiciarem maior capacidade de produção e menor tempo de processamento, é possível baixar o custo de produção quando se trabalha em menores rotações.
4. A análise de desempenho do DPM-4 demonstra que o aumento da capacidade de produção pode não significar maior eficiência.

## LITERATURA CITADA

- Bianchini, A. Desenvolvimento teórico experimental de disco de corte dentado passivo para corte de palhiço em cana-de-açúcar. Campinas: UNICAMP, 2002. 218p. Tese Doutorado
- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Metodologia para ensaios de equipamentos eletrorrurais. Rio de Janeiro: CEPEL, 2000. 31p.
- Dias, G. P.; Vitória, E. L.; Reis, E. F.; Khoury Júnior, J. K. Banca de testes de equipamentos eletrorrurais. In: Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica, 3, 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP/IEEE, 1998. p.669.
- MME – Ministério de Minas e Energia. CGIEE – Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética. Implementação da Lei de Eficiência Energética. Brasília: MME, 2002. 88p.
- Pereira, A. V.; Ferreira, R. P.; Passos, L. P.; Freitas, V. P.; Verneque, R. S.; Barra, R. B.; Silva, C. H. P. Variação da qualidade de folhas em cultivares de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) e híbridos de capim-elefante x milheto (*P. purpureum* x *P. glaucum*), em função da idade da planta. Ciência e Agrotecnologia, v.24, n.2, p.490-499, 2000a.
- Pereira, S.; Dias, G. P.; Oliveira Filho, D.; Souza, L. C. V. Metodologia para avaliação de desempenho e produção específica de picadoras e ensiladoras de forragem. In: Primeiro Seminário Energia na Agricultura, 1, 2000, Uberaba. Anais... Uberaba: CEMIG, 2000b. p.3.41.
- Persson, S. Factors, influencing forces, energy and power. In: ASAE. Mechanics of cutting plant material. St. Joseph: ASAE, 1987. p.161.
- Rodrigues, D. E. Avaliação do desempenho de cinco marcas de Desintegrador/Picador/Moedor (DPM) na moagem do milho. Viçosa: UFV, 2000. 51p. Dissertação Mestrado
- Silva, D. F.; Souza, C. M.; Oliveira, A. D. Máquinas para corte de forragem. <http://www.ufv.br/poscolheita/colheita/forragens>. 15 Dez. 2003.
- Silva, S. C.; Faria, V. P.; Corsi, M. Sistema intensivo de produção de leite em pastagens de capim-elefante do Departamento de Zootecnia da ESALQ. In: Congresso Brasileiro de Gado Leiteiro, 1996, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1996. p.97.
- Visvanathan, R.; Sreenarayanan, V. V.; Swaminathan, K. R. Effect of knife angle and velocity on the energy required to cut cassava tubers. Journal of Agricultural Engineering Research, v.64, p.99-102, 1996.