**MODELAGEM DINÂMICA E OTIMIZAÇÃO METAHEURÍSTICA
PARA APOIO À TOMADA DE DECISÕES
NA RECRIA E ENGORDA DE BOVINOS DE CORTE**

LUÍS GUSTAVO BARIONI

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **MOACYR CORSI**

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia, Área de
Concentração: Ciência Animal e
Pastagens.

PIRACICABA
Estado de São Paulo – Brasil
Fevereiro - 2002

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Barioni, Luís Gustavo

Modelagem dinâmica e otimização metaheurística para apoio à tomada de decisões na recria e engorda de bovinos de corte / Luís Gustavo Barioni. - - Piracicaba, 2002.
100 p.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.
Bibliografia.

1. Bovinocultura de corte 2. Engorda 3. Inovação tecnológica 4. Modelagem matemática 5. Otimização combinatória 6. Recria I. Título

CDD 636.213

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

A Deus,

Ofereço

À minha querida esposa,

Renata,

cujo amor não é simulação,

Dedico com carinho

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, amparo bem presente na hora da tribulação. Minha esposa Renata e minha filha Ana Elisa pelo amor e compreensão, que me fortaleceram durante os momentos difíceis dessa caminhada. À minha esposa ainda devo grande parte desse trabalho pelo seu esforço na digitação e formatação dos textos.

Aos meus pais, Isidro e Meudes, pelo amor e apoio em todos os momentos.

Aos meus sogros José e Neuza pela paciência e apoio.

Aos meus irmãos Graziela e Rodrigo Otávio pelo grande incentivo.

Ao professor Moacyr Corsi pelo seu incentivo, ensinamento, conselhos, e compreensão.

Ao Dr. Simon J.R. Woodward, exímio profissional e pessoa admirável agradeço pelos seus ensinamentos e sua generosidade em disponibilizar material bibliográfico e implementação de seus programas.

Ao Dr. David McCall pelas oportunidades, ensinamentos e confiança em meu trabalho.

Ao Dr. Luís Orlindo Tedeschi, a quem admiro pela capacidade, agradeço sua amizade, grande apoio e paciência em transmitir seus conhecimentos.

Aos professores Dante P.D. Lanna e Celso Boin, que foram constantemente fonte de conhecimento e incentivo para a execução desse trabalho.

Aos amigos Sérgio Raposo Medeiros, Marco Antônio Penati, pelo compartilhar gratificante dessa jornada.

Ao Pastor Dr. José Carlos Barbosa pelo seu exemplo, ensinamentos de vida e generosidade.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária por permitir meu afastamento das atividades para finalização desse trabalho.

Aos brilhantes programadores Valdeci, Nelson e Raul que assumiram comigo o desafio de implementação do programa desenvolvido nesse trabalho e não mediram esforços para que este fosse concluído.

Ao suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo que possibilitou a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

página

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	ix
RESUMO	xv
SUMMARY.....	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 Sistemas computacionais de apoio à tomada de decisão	5
2.2 Abordagens básicas em modelagem matemática	7
2.3 Modelos de crescimento animal e avaliação de dietas.....	10
2.4 Otimização de modelos matemáticos	16
2.5 Conclusões.....	18
3 MODELO DINÂMICO DE INGESTÃO, BIOENERGÉTICA E CRESCIMENTO PARA SIMULAÇÃO DE GANHO COMPENSATÓRIO EM BOVINOS DE CORTE	19
RESUMO	19
SUMMARY.....	20

3.1	Introdução	20
3.2	Material e métodos	22
3.2.1	Energia Disponível na Dieta e Exigências Protéicas	22
3.2.2	O modelo de Oltjen et al. (1986)	23
3.2.3	Integração da Ingestão aos processos de Metabolismo e Crescimento	30
3.2.3.1	Dinâmica Energética	30
3.2.3.2	Potencial fisiológico de uso de energia	33
3.3	Resultados e discussão	37
3.3.1	Dinâmica do Crescimento Animal	37
3.3.2	Crescimento Compensatório	39
3.4	Conclusões	46
4	OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DA ENGORDA CONFINADA DE BOVINOS DE CORTE	47
	RESUMO	47
	SUMMARY	48
4.1	Introdução	49
4.2	Material e métodos	51
4.2.1	Otimização da dieta	51
4.2.1.1	Otimização linear	52
4.2.1.2	Otimização não linear	55
4.2.2	Otimização em dupla camada de dietas de custo mínimo de produção.	60
4.2.3	Ponto ótimo de abate	62
4.2.3.1	Receitas	63
4.2.3.2	Despesas	64

4.2.3.3	Otimização com variação dos preços pagos pelo peso do animal.....	67
4.2.4	Otimização combinada de dietas e período de confinamento	69
4.2.4.1	Otimização com restrição na disponibilidade de volumosos.....	71
4.3	Resultados e discussão.....	72
4.3.1	Época e peso de entrada.....	76
4.3.2	Dietas	79
4.3.3	Peso de Abate e Tempo de Confinamento	79
4.3.4	Otimização simultânea	79
4.4	Conclusões.....	81
5	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÊNDICES	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ϕ_0	Custo de aquisição dos animais para confinamento
ϕ_a	Custos variáveis relativos ao número de animais confinados
ϕ_f	Custos fixos
ϕ_t	Custos variáveis relativos ao tempo de confinamento
ρ	Constante de proporcionalidade do limite superior de energia lábil
Ω	Remuneração do kilograma de peso vivo do animal ao produtor
$\Delta\varepsilon$	Incremento na restrição energética no problema de minimização de custo da matéria seca
ε_{dieta}	Teor de energia da dieta
ε_{efm}	Teor máximo de energia na fronteira de soluções eficientes para o problema de minimização do custo de matéria seca da dieta
ε_{efn}	Teor mínimo de energia na fronteira de soluções eficientes para o problema de minimização do custo de matéria seca da dieta
ε_{max}	Teor máximo de energia na dieta para o problema de minimização do custo da matéria seca
ε_{min}	Teor mínimo de energia na dieta para o problema de minimização do custo da matéria seca

$\varepsilon_{\text{ótimo}}$	Teor ótimo de energia na dieta para o problema de minimização do custo da matéria seca
$\Omega_{\text{fut max}}$	Preço futuro máximo para Ω
A_i	Proporção do i-ésimo alimento na matéria seca
CC.....	Escore de condição corporal (1 – 9)
CMS	Custo da matéria seca da dieta
DNA	Quantidade de DNA (ácido desoxiribonucleico)
DNAMX	Quantidade de DNA na maturidade
E	Constante de Euler ($e \cong 2.7183$)
$E_{\varepsilon 1}$	Exigência de energia inicial na formulação de dietas pelo Protocolo 1
$E_{\varepsilon L}$	Restrição de energia na dieta
EE	Extrato etéreo na dieta
EELM	Exigência de energia líquida para manutenção
EEMM	Exigência de energia metabolizável para manutenção
E_j	Exigência nutricional do j-ésimo nutriente em base da matéria seca
EL_g	Energia líquida para ganho
ELg	Energia líquida para ganho
ELm	Energia líquida para manutenção
EM	Energia metabolizada
EM_{alimento}	Energia metabolizável do alimento
E_{max}	Potencial de utilização de energia metabolizável pelo animal
EM_{dgordmax}	Taxa máxima de utilização de energia para deposição de gordura
EM_{dprotmax}	Taxa máxima de utilização de energia para deposição de proteína
EM_{MANT}	Exigência energética para manutenção

ER.....	Energia retida
$f_d(t)$	Função cumulativa de custos do confinamento
FDAPB	Proteína bruta indigestível ligada ao FDA
FDNn.....	Fibra detergente neutro corrigida para Nitrogênio
fE_ε	Folga na restrição de densidade energética da dieta no problema de minimização do custo da matéria seca
FEE.....	Fronteira de soluções eficientes do problema de minimização do custo da matéria seca
$F_g(t)$	Função cumulativa do ganho de peso dos animais
G	Quantidade de gordura corporal
%G.....	Porcentagem de gordura corporal
G_6	Massa de gordura do animal em condição corporal 6 a um dado peso
% G_6	Porcentagem de gordura corporal para um animal em condição corporal 6 com um dado peso em jejum
GMD.....	Ganho médio diário dos animais em confinamento
IDMS	Taxa média diária de ingestão de matéria seca
IEL	Ingestão de energia líquida
IEM	Taxa média diária da ingestão da energia metabolizada
IEMNORM.	Ingestão de energia metabolizável padrão segundo o modelo de OLTJEN et al.(1986)
IMSA	Ingestão de matéria seca acumulada durante o período de confinamento
K_1	Parâmetro do modelo de OLTJEN et al. (1986) para taxa de deposição de DNA
K_2	Parâmetro do modelo de OLTJEN et al. (1986) para estimativa da síntese de proteína

K_3	Parâmetro do modelo de OLTJEN et al. (1986) para estimativa da taxa de degradação de proteína
KDpb	Fator para digestibilidade da proteína bruta do modelo CNCPS
K_g	Eficiência metabólica para utilização de energia para o ganho de peso
K_m	Eficiência metabólica para utilização de energia para a manutenção
L	Reserva de energia lábil
Lig	Teor de lignina na matéria seca da dieta
Lmax	Limite superior da reserva de energia lábil
MANT	Exigência de energia metabolizável para manutenção
MinCMS	Minimização do custo da matéria seca
MM	Matéria mineral (cinzas)
Mn_i	Teor mínimo do i-ésimo alimento na matéria seca da dieta
Mx_i	Teor máximo do i-ésimo alimento na matéria seca da dieta
NA	Número de animais no confinamento
NDT	Teor de nutriente digestíveis totais
N_{ij}	Concentração do j-ésimo nutriente ou elemento de interesse no i-ésimo alimento
NUT_1	Efeito da restrição energética sobre a taxa de deposição de DNA
NUT_2	Efeito da restrição energética sobre a taxa de deposição de proteína
P	Restrição de energia metabolizável segundo o modelo de OLTJEN et al. (1986)
PB	Teor de proteína bruta da dieta
P_i	Preço do i-ésimo alimento

PROT	Quantidade corporal de proteína
PROTDEG	Taxa de degradação de proteínas
PROT _E	Quantidade máxima de proteínas em equilíbrio com a massa de DNA corporal do animal
PROT _{max} .	Quantidade máxima de proteínas para a quantidade de DNA do animal na maturidade
PROTSYN.	Taxa de síntese de proteínas
PV _f	Peso vivo do animal ao final do confinamento
PV _i	Peso vivo do animal antes do confinamento
PV _j	Peso vivo em jejum
PV _z	Peso vazio do animal
PV _{zM}	Peso vazio na maturidade
r	Taxa diária de juros
R _{Ai}	Restrição para proporção do i-ésimo alimento
R _{CAP}	Restrição de capital circulante para o confinamento
RGMD	Restrição para o ganho médio diário
RIEM	Restrição na ingestão de energia metabolizável em relação ao potencial
R _{NA}	Restrição para o número de animais no confinamento
R _{Qti}	Restrição para o gasto total do i-ésimo alimento no confinamento
t	Tempo
t_i	Tempo no início do confinamento
t_f	Tempo no final do confinamento
T _j	Nível máximo do j-ésimo nutriente
VEG	Valor energético do ganho

VE_{gord} Valor energético da gordura

VE_{prot} Valor energético da proteína

V_P Taxa de deposição de proteína

VP_c Valor presente líquido da atividade de confinamento

VPD Valor presente das despesas

VPR Valor presente das receitas

W Massa corpórea do animal

z Prazo para o pagamento dos animais abatidos após o fechamento do negócio

MODELAGEM DINÂMICA E OTIMIZAÇÃO METAHEURÍSTICA PARA APOIO À TOMADA DE DECISÕES NA RECRIA E ENGORDA DE BOVINOS DE CORTE

Autor: Luís Gustavo Barioni

Orientador: Prof. Dr. Moacyr Corsi

RESUMO

O planejamento da atividade de engorda confinada de bovinos de corte inclui decisões complexas tais como o número de animais a confinar, quando iniciar o confinamento, qual o peso do animal no início do confinamento, formulação e balanceamento da ração e melhor data de venda dos animais. Para melhor avaliar a combinação desses fatores, um modelo matemático dinâmico de crescimento de bovinos de corte baseado em conceitos de crescimento hiperplásico e hipertrófico foi desenvolvido contendo DNA, massa de proteína, massa de gordura e reserva de energia lábil como variáveis de estado. O modelo foi expresso através de equações diferenciais e integrado utilizando o método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem foi construído para simular o crescimento de bovinos. A ingestão de matéria seca foi calculada dinamicamente em função da demanda energética do animal, a qual foi calculada com base nos potenciais de deposição de gordura e proteína. O potencial de deposição de proteína foi calculado em função das quantidades de

DNA e proteína corporal. O potencial de deposição de gordura foi calculado em função do escore de condição corporal do animal. Resultados de simulações mostram que os conceitos utilizados capacitaram a simulação de taxas decrescentes de ganho com a maturidade do animal e aumento das taxas de ganho e ingestão após o período de restrição alimentar. A intensidade e duração do ganho compensatório foram afetados pela intensidade e duração da restrição. O modelo mostrou desejável tendência a um equilíbrio em composição e condição corporal. O nível de equilíbrio dependendo do peso do animal e densidade energética da dieta. Simulações com o modelo de crescimento foram utilizadas para determinar o ponto ótimo de abate dos animais. A composição da dieta foi otimizada isoladamente utilizando-se programação linear. Utilizou-se simultaneamente simulação dinâmica, programação linear e um algoritmo genético para determinar soluções para um problema abrangente de otimização de confinamento de bovinos de corte, incluindo o número de animais a confinar, data para o início do confinamento, peso inicial dos animais a serem confinados, composição da dieta e data de venda sujeitos a restrição de capital e quantidade de forragem. Os resultados das simulações e otimizações mostraram que o peso de abate e a extensão do período de confinamento foram afetados pelo custo da dieta, de forma que as dietas mais caras demandaram confinamentos mais curtos e pesos de abate mais baixos. Dietas de custo mínimo de produção não produziram necessariamente máximo retorno econômico em condições de estacionalidade de preços pagos pelos animais. Épocas de compra e venda constituíram-se em um dos mais importantes aspectos para atingir o máximo retorno econômico. Quando restrição na quantidade de forragem foi imposta as estratégias ótimas incluíram maiores pesos dos animais adquiridos, compra tardia, menores períodos de confinamento e maior densidade energética na dieta, porém a data de abate foi mantida. O uso simultâneo de programação linear para otimização de dietas, simulação dinâmica e um algoritmo genético gerou soluções robustas para o problema genérico de otimização de confinamento considerado.

DYNAMIC MODELING AND METAHEURISTIC OPTIMIZATION FOR DECISION SUPPORT IN BEEF CATTLE PRODUCTION

Author: Luís Gustavo Barioni

Adviser: Prof. Dr. Moacyr Corsi

SUMMARY

Strategic decisions to increase the profitability in feedlot operations such as number of animals, initial body weight, commence and end of the feeding period, and diet composition are required. In order to better evaluate strategies combining those factors, a dynamic mathematical model of beef cattle growth was developed. The model is based on concepts of hyperplasia and hypertrophy. State variables are protein mass, DNA mass, fat mass and labile metabolizable energy reserve pool. The labile energy pool worked as a buffer between energy intake and energy use and modulated both rates. Dry Matter and Energy intake were calculated interactively and were function of animal energy demand that was calculated base on potential rates of protein and fat accretion. Fat accretion potential was modified by body fatness. Simulation results showed that the model enabled simulating decreasing growth rates with advance of animal maturity and increased intake and growth rates after restriction periods. Intensity and duration of compensatory growth were affected

by intensity and duration intensity of restriction. Simulations with the growth model were used to determine the optimal slaughter date of the animals. Ration composition was optimized using linear programming and dynamic simulations, linear programming and a genetic algorithm running concurrently was used to determine solutions of an extensive optimization problem subject to constraints of capital and feed availability. Analyses of the simulations and optimizations results' indicated that both the body weight at slaughter and the extension of the feedlot period were affect by the cost of the ration. Increasing the feed costs lowered the slaughter weights and shortened the feeding periods. Diets with the lowest production cost did not produce the maximum economical return given the conditions of beef prices. The date of purchase and sale were one of the most important aspects in reaching maximum economical return. When forage limitation was included in the problem the solutions tended to have later purchase, heavier animals, shorter feeding period, and higher energy density in the diet. Slaughter date was however unchanged. The combination of a genetic algorithm, linear programming to diet optimization and dynamic simulation was able to generate robust solutions to the general feedlot problem.

1 INTRODUÇÃO

A pressão por eficiência na produção de bovinos abrange aspectos econômicos, ambientais e sociais. A implantação de sistemas mais lucrativos e ecologicamente adequados, harmonicamente inseridos na cadeia produtiva e contexto social, depende do arsenal de recursos e tecnologias disponíveis e também da gerência eficiente desses meios. Existe demanda, portanto, por métodos eficazes de análise que permitam a avaliação quantitativa do impacto de diferentes recursos e tecnologias em situações específicas. Tais análises dependem, por sua vez, da capacidade de previsão permitida pelo conhecimento científico existente. Fick et al. (1994) afirmam que “Uma das características de uma ciência madura é sua capacidade de predizer ” e “ a capacidade preditiva é demonstrada pela construção e aplicação de modelos quantitativos”.

Modelos matemáticos contribuem na avaliação de novas tecnologias, na previsão e na avaliação quantitativa do comportamento dos sistemas de produção nas diversas condições às quais estes possam ser submetidos (Simpson et al., 1996). Modelos matemáticos permitem, adicionalmente, uma abrangência espaço-temporal muitas vezes inviável à pesquisa experimental (Thornley, 1996).

A formalização das fases de planejamento, monitoramento e controle no ciclo administrativo, sendo implantados em diversos sistemas de produção comerciais, produzem a oportunidade para sistemas de apoio à tomada de

decisão, baseados em modelos matemáticos tornarem-se importante veículo de difusão de conhecimento científico, aumentando o impacto da pesquisa sobre o sistema de produção (Stuth et al., 1993). Entretanto, o inegável potencial das técnicas de modelagem matemática contrasta com seu nível de contribuição atual em sistemas de produção de bovinos nos trópicos.

Esse fato talvez se explique devido à produção de bovinos possuir flexibilidade ímpar na utilização de pacotes tecnológicos, insumos e intensidades de uso de terra e capital, e na sua capacidade de integração. Essa versatilidade, dificilmente encontrada em outras atividades produtivas na agricultura comercial moderna, se delineia de forma extrema na pecuária brasileira e latino-americana. No Brasil Central, milhares de hectares de pastagens degradadas com lotações médias anuais abaixo de 0,4 UA/ha e produções na faixa de 25 a 100 kgPV/ha/ano (Zimmer e Correa, 1999) avizinham sistemas extremamente intensivos, envolvendo pastagens adubadas e irrigadas com lotações superiores a 7,0 UA/ha/ano e produtividade acima de 1500 kg de ganho de peso vivo/ha/ano (Corsi et al., 2000; Cardoso, 2001) e sistemas de engorda confinada ou semi-confinada (Corsi et al., 2000). Adicionalmente, sistemas integrados agricultura-pecuária (Kluthcouski et al., 1999), sistemas silvopastoris (Pereira e Rezende, 1997), sistemas envolvendo consorciações gramíneas-leguminosas (Barcellos et al., 2000), sistemas de produção de novilho precoce (Silveira et al., 2001) contribuem para produção de um mosaico de combinações estruturais possíveis nos sistemas de produção de bovinos. Essa flexibilidade confere ao sistema capacidade de adaptação a diversas condições econômicas, climáticas, e recursos regionais, contribuindo para a ubiquidade da produção de bovinos.

Enquanto, por um lado, essa gama de possibilidades valoriza a administração do sistema e ferramentas de tomada de decisão, por outro dificulta o trabalho de modeladores em encontrar estruturas suficientemente robustas e genéricas em seus modelos. A maioria dos modelos matemáticos relacionados à produção de bovinos tem procurado focalizar sistemas

específicos, enfatizando seus componentes e processos fundamentais (Woodward, 1998).

A estacionalidade da produção de forragem, em resposta a condições climáticas vigentes no Brasil Central (Villa-Nova et al., 1999), gera uma tendência à maior produtividade e menores custos de produção durante a época quente e chuvosa. Isso se reflete em uma estacionalidade de oferta de bovinos terminados no mercado (Anualpec, 2002).

O uso da prática de confinamento vem se difundindo rapidamente no Brasil Central e tem contribuído para a redução da sazonalidade de oferta e preços da carne bovina no mercado (Lazzarini et al., 1995). Entretanto com a redução da estacionalidade de preços entre safra e entressafra, a continuidade da difusão da prática de confinamento de bovinos de corte, e o aumento dos índices biológicos de produtividade, dependem da existência de vantagem econômica desse sistema.

A otimização da eficiência econômica de confinamento de bovinos de corte requer modelos de nutrição e crescimento animal que sejam capazes de prever a ingestão de alimento e o desempenho animal para as diferentes estratégias de ação possíveis para o produtor (Barioni et al., 1999). Embora modelos matemáticos de crescimento de bovinos tenham se desenvolvido vigorosamente nas últimas décadas, a combinação de tais modelos à algoritmos de otimização de problemas abrangentes não têm sido igualmente frutífera, provavelmente devido aos problemas associados à otimização de sistemas dinâmicos e não lineares (Mayer et al, 1996).

1.1 OBJETIVOS

Nesse contexto, colocam-se como objetivos desse estudo:

O desenvolvimento de um modelo dinâmico de crescimento animal, capaz de prever a dinâmica da ingestão, ganho de peso e composição do ganho de bovinos de corte em crescimento provenientes de diversas condições de alimentação prévia e capaz de produzir respostas de ganho compensatório

semelhante às encontradas na prática em sistemas comerciais de produção no Brasil e,

a otimização de confinamento utilizando metodologia capaz de dar respostas a problemas genéricos com o uso de modelos dinâmicos e não-lineares de crescimento animal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMAS COMPUTACIONAIS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO

Computadores estão se tornando uma parte integrante da administração de sistemas agrícolas. Embora a pecuária seja uma das atividades agrícolas menos informatizadas, com 3% das unidades de produção do Estado de São Paulo possuindo computadores, em contraste com cerca de 10,5% para Pinus, 6,9% para Cana de Açúcar e 4,2% para Laranja (Francisco & Martin, 1999), a adoção de microcomputadores e software agrícola por produtores rurais cria oportunidade para aumento da eficiência com a qual dados, informações, conhecimento e tecnologia são transferidos de universidades e instituições de pesquisa para produtores e consultores. O desenvolvimento e disseminação de software específico para uso na administração de sistemas agrícolas também é cada vez mais evidente. Em julho de 2000, já haviam cadastrados no site Agrosoft (<http://www.agrosoft.com.br>), quase duas centenas de programas para utilização no setor e a internet vem ocupando cada vez mais espaço no cenário de difusão de informações no setor agrícola. O Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA-ESALQ/USP) informa que já existem no Brasil 2491 sites voltados para o agronegócio, 266 deles relacionados à pecuária bovina.

Existe, dessa forma, um aumento bastante rápido da quantidade de dados e informações disponíveis ao produtor. Essas informações, entretanto,

necessitam ser processadas de modo a proporcionar tomada de decisão mais eficiente no sistema de produção.

O problema de decisão surge, em primeiro plano, devido à existência de informação incompleta ao administrador sobre os resultados das alternativas existentes (Blackie & Dent, 1979). A informação completa sobre o futuro é impossível de ser obtida e, portanto, qualquer decisão envolve risco. Entretanto, o maior acesso a informação pode aumentar a eficiência na tomada de decisão (Anderson et al., 1977; Turban, 1988).

A análise de decisão envolve o processamento de dados de forma a destacar cursos de ação que possuem maior probabilidade de sucesso (Turban, 1995). Nesse contexto, sistemas de apoio à tomada de decisão podem ajudar no diagnóstico do problema, na previsão dos resultados de diferentes decisões e na escolha de uma alternativa superior (Figura 1). Tecnologias ligadas à informática como bancos de dados locais e remotos, sensoreamento remoto, rastreabilidade, sistemas especialistas e modelos matemáticos têm todos um papel a cumprir em aumentar a agilidade e qualidade de decisões por parte de produtores rurais.

Modelos de simulação são úteis para o aumento da capacidade de previsão de resultados de diferentes decisões e estudar a sensibilidade do sistema a diferentes manejos e quantidades de fatores de produção. Métodos de otimização por sua vez podem utilizar tais modelos para destacar alternativas superiores.

A modelagem de sistemas tem sido, desde seus primórdios, ligada à teoria de sistemas, de modo que muitas vezes os termos são utilizados indistintamente. O cerne da teoria de sistemas é o conceito de que a resposta do sistema a um estímulo não é igual ao resultado da resposta de cada um de seus componentes (Doyle, 1990). As interações dinâmicas entre os componentes são os determinantes primários de seu comportamento (Bywater, 1990). Dessa maneira estudos isolados de componentes do sistema são inadequados para previsão das respostas do sistema como um todo.

A modelagem matemática constitui-se em uma das principais metodologias para o desenvolvimento de sistemas de apoio à tomada de decisões (Bywater, 1990).

Figura 1– O papel de sistemas de apoio à tomada de decisão no ciclo de solução de problemas (Adaptado de Turban, 1995).

2.2 ABORDAGENS BÁSICAS EM MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelos matemáticos podem ser baseados diretamente em dados observados, submetidos ou não à análise estatística. Normalmente tais modelos são constituídos por equações cujos parâmetros são determinados através de regressão. Tais modelos são denominados modelos empíricos (Blackie & Dent, 1979). De outro modo, modelos matemáticos podem ser desenvolvidos com base em relações teóricas entre os componentes de um determinado sistema. Essas relações podem incluir um ou mais níveis de agregação (célula, tecido, animal, etc.). Modelos que utilizam relações teóricas de níveis inferiores de agregação para explicar os mecanismos e quantificar o comportamento de um sistema em um nível superior de agregação são chamados mecanísticos

(Thornley & Johnson, 1990). Alguns modelos, por exemplo, prevêem a taxa de crescimento de um animal a partir de fenômenos ao nível de tecido e entidades bioquímicas como DNA e ATP (Baldwin, 1995).

A simplificação é uma das características básicas do processo de modelagem, uma vez que modelos são, por definição, simplificações intencionais da realidade (Rothemberg, 1989). A decisão quanto ao nível de simplificação depende do comportamento do sistema que se deseja simular, do nível de conhecimento existente sobre o sistema, dos dados existentes para parametrização, dos dados de entrada que são plausíveis serem requeridos do usuário e da demanda computacional associada.

A complexidade de um modelo está relacionada com os componentes e processos considerados. Modelos de sistemas podem envolver componentes e processos associados a diferentes níveis de agregação (Figura 2) e podem incluir ou desprezar processos de forma a atingir um nível adequado de complexidade. Enquanto a adição de novos componentes e processos pode levar à maior generalidade na resposta do modelo (Thornley & Johnson, 1990), essa maior complexidade não se reflete necessariamente em maior capacidade preditiva (Passioura, 1996).

A simplicidade é considerada uma virtude em modelagem matemática, porém, a omissão de alguns processos do sistema pode mascarar aspectos importantes do seu comportamento (Thornley, 1996). Passioura (1996) sugere que modelos matemáticos possuem duas fontes básicas de erros: a) erros de estrutura, associados à escolha dos processos a serem considerados no modelo e como tais processos serão representados, e b) erros relacionados à parametrização, ou seja, do valor dos parâmetros obtidos experimentalmente. Segundo aquele autor o aumento de complexidade do modelo leva à redução do erro associado à estrutura do modelo, por ser mais realista na inclusão dos componentes e processos operando no sistema. Entretanto o erro de parametrização aumenta em resposta à inclusão de novos parâmetros a serem estimados. Um modelo deve, portanto, ser tão simples quanto possível e tão

complexo quanto necessário para uma dada aplicação, de modo a atingir um balanço ótimo entre erros de estrutura e parâmetros.

Figura 2 - Níveis de agregação em sistemas e sua relação com modelos empíricos e mecanicistas. Modelos mecanicistas possuindo modelos empíricos em níveis inferiores de agregação.

Modelos matemáticos podem ser classificados quanto à forma de tratar a relação do sistema com o tempo em modelos estáticos e dinâmicos. Modelos estáticos desconsideram efeitos na mudança do estado do sistema com o tempo sobre seu comportamento. Esses modelos assumem que o estado do sistema em um determinado ponto no tempo é suficiente para a predição de seu comportamento e que seus estados transitórios não influenciam os resultados e, portanto, não necessitam ser calculados. Os modelos estáticos são claramente os mais utilizados atualmente nos sistemas de alimentação de ruminantes dos diversos países desenvolvidos. São exemplos os modelos do Institut National de la Recherche agronomique - INRA (1989), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization - CSIRO (1990), Agricultural and Food Research Council - AFRC (1993), National Research Council - NRC (1996).

Modelos dinâmicos são empregados na representação de sistemas nos quais as variações de estado são relevantes na previsão de seu comportamento e/ou quando existe interesse no estudo da seqüência estado-temporal das variáveis do sistema. Modelos dinâmicos são baseados em fluxos e podem ser resolvidos utilizando-se equações de diferenças ou por equações diferenciais. Equações de diferença assumem a forma: $VS_{t+dt} = VS_t + TVVS_t * dt$, onde VS representa uma variável qualquer que representa o estado do sistema (denominada variável de estado), TVVS representa a taxa de variação da variável de estado que pode ser calculada como uma função qualquer $TVVS_t = f(x,y,z,t)$, t representa o tempo atual e dt representa o passo de tempo para o qual a variação do estado do sistema será calculada. Os modelos de crescimento de Loewer et al. (1983) e Oltjen et al. (1986) são exemplos desse tipo de modelo.

Equações diferenciais assumem a forma: $\frac{dSV_j}{dt} = f(SV_i, x_i)$, onde SV_i e SV_j

designam variáveis de estado do sistema e x_i é uma variável auxiliar (variável de decisão ou externa). A dinâmica do sistema pode ser então calculada integrando-se as equações diferenciais para cada variável de estado do sistema (Thornley, 1996). Em alguns sistemas a integração pode ser feita analiticamente (Woodward, 1998). Entretanto, na maioria dos sistemas a integração é realizada por algoritmos de integração numérica, sendo os métodos de Runge-Kutta os mais empregados (Garcia, 1997). Assim os modelos dinâmicos são resolvidos iterativamente. A representação de sistemas por equações diferenciais tem se tornado o padrão na modelagem de sistemas dinâmicos na agricultura, devido sua maior precisão e possibilidades de tratamento matemático.

2.3 MODELOS DE CRESCIMENTO ANIMAL E AVALIAÇÃO DE DIETAS

Os modelos de crescimento animal variam em objetivos, tratamento do tempo, nível de agregação, processos modelados e complexidade. Um ou mais dos seguintes objetivos tem sido perseguidos pelos atuais modelos de

crescimento animal: (a) Prever o ganho de peso e a composição do ganho de um animal em um dado estágio de sua vida e condições nutricionais (NRC, 1996), (b) Capacitar a estimativa das exigências nutricionais de tais animais (NRC, 1996), (c) Capacitar a formulação de dietas mais viáveis economicamente (Lanna et al., 1999), (d) Estudar as implicações de ganho compensatório (Soboleva et al., 1999) e (e) Estudar os efeitos de agentes modificadores da partição de nutrientes (Sainz & Wolff, 1990)

O crescimento obviamente depende da ingestão e digestão de nutrientes pelo animal, incluindo, no caso de ruminantes, processos relativos à fermentação ruminal. Diversos modelos de funcionamento ruminal têm sido propostos para previsão de seus produtos disponíveis para absorção por ruminantes (Baldwin, 1995). Entretanto, a literatura freqüentemente define “modelos de crescimento” como aqueles relacionados aos processos pós-absortivos de utilização de nutrientes e/ou energia (Baldwin, 1995). Esses modelos incluem previsão de gastos energéticos para processos não produtivos (manutenção), partição de nutrientes entre tecidos (músculo, víscera, osso e gordura) e a eficiência de utilização dos nutrientes nesses processos. Na maioria das vezes modelos de crescimento são desenvolvidos independentemente dos modelos de disponibilidade de nutrientes e utilizam quantidade de energia (Loewer et al., 1983; Oltjen et al., 1986; Soboleva et al., 1999) ou taxas de absorção de nutrientes (Sainz & Wolff, 1990) como dados de entrada.

Em modelos que utilizam energia como dado de entrada, o funcionamento do modelo assume conservação de energia. As eficiências de utilização para manutenção e ganho são utilizadas para conversão da energia ingerida em energia retida nos tecidos. Nesses modelos o ganho de peso é calculado como a razão entre energia retida (ER) e o valor energético do ganho (VEG), como na equação (1):

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\frac{dER}{dt}}{\frac{dW}{dER}} \Rightarrow GMD = \frac{ER}{VEG} \quad (1)$$

onde W é o peso do animal, t é tempo, ER é a energia retida e VEG é o valor energético do ganho.

Entretanto, como a massa corporal de animais vivos incorpora conteúdo gastrointestinal, o qual é considerado exógeno ao organismo e varia consideravelmente dentro de curtos espaços de tempo, a maioria dos modelos (INRA, 1989; CSIRO, 1990; NRC, 1996; Fox et al., 2000), relacionam crescimento e composição ao peso vivo vazio (PVz). De forma que W representaria PVz nas equações apresentadas.

A energia retida é normalmente calculada subtraindo-se a exigência energética para manutenção da ingestão de energia do animal (equação 2). Em sistemas que utilizam energia metabolizável para os cálculos das exigências e da ingestão é necessário utilizar-se um coeficiente (k_g) para conversão da energia metabolizável em energia líquida (equação 3).

$$\frac{dER}{dt} = \frac{dIEL}{dt} - EELM, \text{ ou } ER = IEL - EELM, \quad (2)$$

$$\frac{dER}{dt} = k_g \left(\frac{dIEM}{dt} - EEMM \right), \text{ ou } ER = k_g (IEL - EELM), \quad (3)$$

onde IEL e IEM representam a ingestão de energia líquida e energia metabolizável, respectivamente, $EELM$ e $EEMM$ são as exigências de energia líquida e metabolizável para manutenção e k_g é a eficiência de ganho, isto é a razão entre energia retida e ingestão de energia metabolizável acima de manutenção.

Combinando-se as equações (1) e (2) ou (1) e (3) obtemos a equação básica dos sistemas convencionais de exigências nutricionais descrita em (4) para sistemas de energia líquida e (5) para sistemas de energia metabolizável e previsão de crescimento de bovinos.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\frac{dIEL}{dt} - EELM}{\frac{dER}{dW}}, \quad \text{ou} \quad GMD = \frac{IEL - EELM}{VEG} \quad (4)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{k_s \left(\frac{dIEM}{dt} - EEMM \right)}{\frac{dER}{dW}}, \quad \text{ou} \quad GMD = \frac{k_s (IEM - EEMM)}{VEG} \quad (5)$$

Embora modelos dinâmicos de crescimento baseados em energia obedeçam aos mesmos princípios implícitos nas equações (4) e (5), o crescimento é usualmente calculado como função do estado do animal em um instante no tempo. No modelo de Oltjen et al. (1986), por exemplo, o crescimento é função das massas de DNA e proteína no animal, que modificam o valor energético do ganho. Uma abordagem semelhante é encontrada no modelo de Soboleva et al. (1999), onde as massas de músculo, víscera e gordura do animal determinam a composição do ganho e as taxas de crescimento.

A maioria dos modelos estáticos de crescimento se enquadram na forma apresentada pela equação 5. As diferenças entre os modelos se apresentam principalmente nos conceitos e equações utilizadas nas estimativas da exigência de manutenção, ingestão de energia, densidade energética do ganho e eficiência de utilização da energia metabolizável.

Os modelos propostos para avaliação de dietas buscam basicamente adequar a dieta às exigências do animal, avaliar a ingestão, desempenho animal, custo de produção e otimizar a formulação de dietas. A Figura 3 apresenta a estrutura básica de sistemas de avaliação nutricional de dietas.

Figura 3 - Estrutura básica de modelos de avaliação e formulação de dietas.

Modelos estáticos de crescimento, adotados nos sistemas de padrões de nutrição de ruminantes, atingiram alto grau de acurácia na previsão das taxas de crescimento, principalmente para animais confinados e em terminação. Tais

modelos utilizam conceitos de eficiência energética em termos do animal como um todo.

Esses modelos apresentam como vantagem facilidade para incorporação de fatores de correção que podem ser adicionados para calibrar as equações para condições específicas. Ainda em prol desses modelos está sua baixa demanda computacional e facilidade de implementação, inclusive em planilhas eletrônicas.

Entretanto, entre as principais limitações aos modelos estáticos atuais, estão: (1) não estimar os estados transitórios do animal, inabilitando simulação adequada de ganho compensatório e (2) a utilização da eficiência de utilização de energia é função da própria concentração energética dos alimentos. As formas como essa energia é contida (gordura, proteína, etc) e suas possíveis interações no metabolismo e composição do ganho são desconsideradas. Além disso, diversas equações nesses sistemas combinam o efeito de vários fenômenos e/ou processos biológicos. As equações de eficiência de ganho em função da densidade energética dos alimentos, por exemplo, incluem fenômenos como partição do ganho, variação das exigências de manutenção e mudança no perfil de ácidos graxos voláteis no rúmen. As equações de ingestão não separam os efeitos quimostáticos e de enchimento dos alimentos. Isso faz com que esses modelos não sejam adequados para estudos teóricos do efeito de modificadores metabólicos. Modelos dinâmicos, em contrapartida, possuem maior demanda computacional e possuem desenvolvimento e parametrização freqüentemente mais complexos (Oltjen et al., 2000). Alguns modelos desse tipo podem permitir simular mais adequadamente os efeitos de período e intensidade de restrição e realimentação sobre manutenção, composição do ganho e ingestão (embora a dinâmica da ingestão seja usualmente desprezada nos modelos revistos).

Exceção feita ao modelo de Loewer et al. (1983), os modelos dinâmicos de crescimento ainda utilizam a ingestão de nutrientes como variável de entrada e não prevêem ingestão a partir de uma demanda de nutrientes do organismo. Sendo a disponibilidade de nutrientes um dos principais fatores determinantes

do crescimento, é bastante frustrante o estágio atual de desenvolvimento dos modelos matemáticos nesse aspecto.

Existe a expectativa de que modelos de metabolismo de nutrientes, com o tempo, serem incorporados para previsão da eficiência de ganho em sistemas de avaliação de dietas. A descrição dos alimentos e dos produtos da digestão ruminal, entretanto, certamente necessitarão ser definidos com maior precisão. Parece evidente que os sistemas de alimentação irão se valer de modelos dinâmicos para melhorar sua capacidade preditiva em situações de alimentação diversas daquelas onde foi desenvolvido, no futuro. As dificuldades no desenvolvimento e as limitações ainda encontradas nos modelos atuais em contraste a uma certa maturidade já alcançada pelos modelos estáticos podem brevemente retardar, mas não evitar sua adoção na previsão do desempenho animal em larga escala.

2.4 OTIMIZAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS

O comportamento de um sistema dinâmico é basicamente função do estado do sistema, representado por variáveis denominadas variáveis de estado, e de estímulos resultantes de fatores alheios ao controle do administrador do sistema (sem o controle do administrador) e de estímulos resultantes da ação de seu administrador. Variáveis que quantificam ações dependentes de decisões tomadas sobre o sistema são denominadas variáveis de decisão (Athans, 1972).

O desenvolvimento de algoritmos para otimização de sistemas tem sido uma área de intensa pesquisa nas últimas décadas (Avriel & Golany, 1996) e tem sido recentemente aplicada a otimização de sistemas de produção animal (Mayer et al., 1996; Barioni et al., 1999).

Segundo Mayer et al. (1996) ocorrem três problemas básicos para os métodos de otimização: 1. funções derivadas não estão disponíveis ao algoritmo de otimização e, portanto, necessitam ser aproximadas numericamente; 2. a maioria dos problemas possuem restrições de ordem prática que precisam ser acomodadas pelo uso de funções de penalidade ou um método de otimização

restrito; e 3. superfícies multidimensionais de resposta às variáveis de decisão raramente são contínuas e convexas e podem apresentar quebras e comportamento errático. A utilização de métodos numéricos de otimização em conjunção com modelos de simulação deve, portanto, ser feita de forma criteriosa, uma vez que a capacidade de tais métodos levarem à convergência de uma solução ótima global do problema depende da habilidade na modelagem matemática e dos valores iniciais utilizados do problema (Figura 4 ; Mayer et al., 1996).

Figura 4- Ilustração do conceito de ótimo local e ótimo global em uma superfície de resposta. Considerando-se que a função objetivo é alcançar o ponto mais alto da superfície, o ponto L é um ponto de ótimo local do problema e G é um ponto de ótimo global (Fonte: GOLDBERG, 1989).

Algoritmos de otimização combinatória, que capacitam a análise de um número finito de soluções possíveis, possuem características de obtenção de boas soluções, e em muitos casos soluções ótimas, em intervalos de tempo reduzidos e compatíveis com as exigências de situações reais. Entre esses métodos incluem-se técnicas metaheurísticas como Tabu Search, Simulated

Annealing e Algoritmos Genéticos (Tsuruta & Narciso, 2000). Tais métodos não requerem cálculo de derivadas e possuem grande potencial na solução de problemas complexos de otimização (Goldberg, 1989), incluindo sistemas de produção animal (Mayer et al., 1996).

2.5 CONCLUSÕES

A adoção de computadores e software agrícola por produtores rurais tem criado oportunidade para aumento da eficiência de transferência de informação e conhecimento. Sistemas de apoio à tomada de decisão baseados em modelos matemáticos e otimizadores podem contribuir para aumentar a eficiência de processamento dos dados em informações relevantes e produzir decisões eficazes.

As principais limitações dos modelos atuais de crescimento animal são relacionadas à inabilidade destes na estimativa da dinâmica do ganho de peso e ingestão de matéria seca de animais em crescimento.

Novos métodos de otimização, capazes de resolução de problemas envolvendo simulação dinâmica e não linear possuem potencial na solução de problemas administrativos complexos em produção animal.

3 MODELO DINÂMICO DE INGESTÃO, BIOENERGÉTICA E CRESCIMENTO PARA SIMULAÇÃO DE GANHO COMPENSATÓRIO EM BOVINOS DE CORTE

RESUMO

Um modelo matemático dinâmico de crescimento de bovinos de corte foi desenvolvido baseado em conceitos de hiperplasia e hipertrofia. As variáveis de estado são: massa de proteína, massa de DNA, massa de gordura e reserva de energia lábil. A reserva de energia lábil funciona como um tampão entre a ingestão e o uso de energia e modula ambas as taxas. A ingestão de matéria seca foi calculada dinamicamente em função da demanda energética do animal, baseada nos potenciais de deposição de gordura e proteína. O potencial de deposição de proteínas foi calculado em função das quantidades de DNA e proteína corporal. O potencial de deposição de gordura foi modulado pelo escore de condição corporal do animal. Resultados de simulações demonstram que os conceitos utilizados capacitaram a simulação de taxas decrescentes de ganho com a maturidade do animal e aumento das taxas de ganho e ingestão após períodos de restrição alimentar. A intensidade e duração da compensação de ganho foram afetados pela intensidade e duração da restrição. O modelo mostrou desejável tendência a um equilíbrio em composição e condição corporal para determinado peso do animal e densidade energética da dieta.

SUMMARY

A dynamic mathematical model of beef cattle growth was developed. The model is based on concepts of hyperplasia and hypertrophy. State variables are protein mass, DNA mass, fat mass and labile metabolizable energy reserve pool. The labile energy pool worked as a buffer between energy intake and energy use and modulated both rates. Dry matter and energy intake were calculated dynamically as functions of animal energy demand, calculated based on potential rates of protein and fat accretion. Fat accretion potential was modified by body fatness. Simulation results show that the model enabled prediction of decreasing growth rates with advance of animal maturity. Increased intake and growth rates after restriction periods, with intensity and duration affected by intensity and duration of restriction were also predicted. The model produced desirable equilibrium of body condition score at fixed liveweight and diet.

3.1 INTRODUÇÃO

A palavra 'crescimento' denota aumento de tamanho em função do tempo (Gill & Oldham, 1993). Devido à medição de extensão, área ou volume em animais vivos ser difícil e imprecisa, convencionou-se medir massa nas relações comerciais e estudos experimentais de crescimento animal. Dessa forma, o crescimento animal é geralmente medido pela taxa de variação da massa corporal, normalmente expressa em kilogramas por dia.

Experimentalmente, estima-se a taxa de crescimento através da diferença entre a massa do animal estimada no início (t_1) e no final (t_2) de um período ($t_2 - t_1$). Embora a massa corporal seja medida de forma discreta (descontínua), o crescimento é considerado um processo contínuo (Gill & Oldham, 1993), implicando num fluxo de nutrientes para deposição de tecidos. Assim, a taxa de crescimento pode ser representada pela diferencial de primeira ordem da variação da massa corporal em relação ao tempo, dW/dt .

Deduz-se que a evolução da massa corporal (W) pode ser calculada pela integração do crescimento sofrido durante toda sua vida, ou seja:

$$W = F_g(t) = \int_{t=t_c}^{td} \frac{dW}{dt}, \text{ onde } t_c \text{ representa o tempo no evento de concepção ou}$$

nascimento e t_d é o tempo decorrido a partir de um desses eventos.

Acredita-se que a ontogenia dos tecidos e o potencial de crescimento do animal sejam geneticamente determinados (Campbell, 1988). Entretanto, o crescimento só se estabelece em níveis potenciais quando o suprimento de nutrientes aos tecidos não é limitante, o que raramente ocorre na prática (Van Soest, 1994). Assim modelos matemáticos de crescimento animal são idealmente associados a modelos de metabolismo ou de disponibilidade de nutrientes.

A ingestão de matéria seca está intimamente associada à utilização de nutrientes pelo animal (Forbes, 1994), entretanto, tem sido usualmente modelada de forma isolada. A maioria dos sistemas de cálculo de exigências nutricionais e desempenho de ruminantes utiliza modelos estáticos e uma seqüência não iterativa de cálculos. A seqüência de cálculos nesses sistemas consiste basicamente em: (1) Estimar a ingestão de matéria seca; (2) Calcular o gasto de energia para manutenção e energia disponível para ganho; (3) Calcular a densidade energética do ganho e o ganho de peso. Normalmente a ingestão de matéria seca é determinada através de uma única equação empírica envolvendo a densidade energética da dieta (ou alguma outra característica da dieta relacionada à ingestão de matéria seca) e o peso do animal (NRC, 1996; Fox et al., 2000). Tais modelos assumem que: (1) A ingestão e a utilização de energia se processam com taxas idênticas, e (2) o estado nutricional prévio do animal não possui efeito sobre a ingestão de matéria seca e potencial de produção. Tais premissas dificultam a modelagem de fenômenos inerentemente associados com a dinâmica da ingestão de energia.

O modelo apresentado nesse trabalho possui a finalidade de integrar os efeitos interativos ingestivo, metabolismo, crescimento de bovinos com a

finalidade de melhor simular a dinâmica do ganho de peso e o de bovinos em crescimento.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho toma por base os cálculos de energia disponível e exigências de proteína do NRC (1996), o modelo dinâmico de Oltjen et al. (1986) e conceitos propostos por Vetharaniam et al (2001) para o desenvolvimento de um modelo integrado de ingestão e metabolismo animal.

3.2.1 *Energia Disponível na Dieta e Exigências Protéicas*

O cálculo de densidade energética do alimento é realizado seguindo o CORNELL NET CARBOHIDRATE PROTEIN SYSTEM - CNCPS nível 1 (Fox et al., 2000), não corrigido para o nível de ingestão. O nível de nutrientes digestíveis totais é computado a partir da composição do alimento utilizando a equação de Weiss et al. (1992).

$$NDT = 0,98(100 - FDNn - PB - MM - EE + FDAPB) + (KDpb.PB) + 2,7(E E - 1) + 0,75(FDNn - Lig) \cdot \left(1 - (Lig / FDNn)^{2/3}\right) - 7 \quad (6)$$

onde NDT é o teor de nutrientes digestíveis totais, FDNn é a fibra detergente neutro corrigida para Nitrogênio, PB é o teor de proteína bruta, MM é a matéria mineral, EE é o extrato etéreo na dieta, FDAPB é a proteína bruta indigestível ligada ao FDA, KDpb é o fator para digestibilidade da proteína bruta do modelo CNCPS, Lig é o teor de lignina na matéria seca da dieta.

Um quilograma de NDT é assumido igual a 4.4 Mcal de energia digestível (NRC, 1996). Um fator de 0.82 é usado para converter energia digestível (ED; Mcal.kg⁻¹) para energia metabolizável (EM; Mcal.kg⁻¹). A energia líquida para

manutenção (ELm ; Mcal.kg^{-1}) e a energia líquida para ganho (ELg ; Mcal.kg^{-1}) são preditas de acordo com as equações (7 e 8), respectivamente.

$$ELm = 1,37 \cdot EM - 0,138 \cdot EM^2 + 0,0105 \cdot EM^3 - 1,12, \quad (7)$$

$$ELg = 1,42 \cdot EM - 0,174 \cdot EM^2 + 0,0122 \cdot EM^3 - 1,65, \quad (8)$$

onde ELm é a energia líquida de manutenção, ELg é a energia líquida de ganho, EM é a energia metabolizada.

A exigência de energia metabolizável para a manutenção é calculada por Fox et al. (2000) como:

$$EM_{MANT} = \frac{0,077 \cdot PV_z^{0,75}}{k_m}, \quad (9)$$

onde:

$$k_m = \frac{ELm}{EM} = 1,37 - 0,138 \cdot EM + 0,0105 \cdot EM^2 - \frac{1,12}{EM}. \quad (10)$$

3.2.2 O modelo de Oltjen et al. (1986)

O modelo de Oltjen et al. (1986) é baseado em dois dos princípios conceitos de crescimento animal. O primeiro conceito é de que o crescimento pode ser devido à hiperplasia (multiplicação celular) ou hipertrofia (aumento do tamanho das células). Assumindo que a quantidade de DNA (ácido desoxiribunucleico) em uma célula é constante durante sua existência, a não ser durante o evento de sua multiplicação, deduz-se que o número de células em um organismo é função da quantidade total de DNA nele contido. Assim, a hiperplasia resulta em aumento na quantidade de DNA presente no organismo e é diretamente proporcional a taxa de variação na quantidade de DNA em relação ao tempo.

Dado que DNA representa o número de células, deduz-se que o tamanho de cada célula pode ser estimado pela razão entre proteína e DNA. Proteína é então utilizada no modelo para representar hipertrofia nos tecidos não gordurosos. DNA é utilizado para representar o crescimento hiperplásico. O modelo adota a premissa que a variação na quantidade de DNA assume a forma de uma curva de saturação em relação ao tempo, proporcional a diferença entre o valor máximo (assintótico) da quantidade de DNA no organismo (denominado DNAMX) e sua quantidade atual, ou seja: $\frac{dDNA}{dt} \propto (DNAMX - DNA(t))$. Assim, a taxa de deposição de DNA é máxima no animal jovem e diminui à medida que o animal se aproxima da maturidade (Figura 1).

Figura 1 - Evolução na quantidade de DNA no tempo quando nutrientes não são limitantes.

A velocidade, com que a quantidade de DNA converge para seu valor assintótico, depende do aporte de nutrientes, o que pode ser traduzido matematicamente pela equação 11.

$$\frac{dDNA}{dt} = k_1 \cdot (DNAMX - DNA(t)) \cdot NUT_1, \quad (11)$$

onde DNAMX é a quantidade máxima de DNA no animal que atingiu a maturidade, DNA é quantidade atual de DNA, NUT_1 é o efeito da nutrição sobre as taxas de deposição de DNA (calculado pela equação 15) e k_1 é um parâmetro estimado empiricamente.

O segundo conceito incorporado ao modelo é o de que o crescimento é resultado de um balanço entre anabolismo e catabolismo. Decorre que a taxa de acúmulo de proteínas é a diferença entre as taxas anabolismo (síntese) e catabolismo (degradação), e pode, portanto, ser representada pela equação diferencial em 5:

$$\frac{dPROT}{dt} = PROTSYN(t) - PROTDEG(t), \quad (12)$$

O modelo assume que a síntese protéica é uma função da quantidade de DNA, enquanto que a degradação de proteína é proporcional à sua massa. DNA e proteína são elevados a potência de 0,73 com base nas observações de que a capacidade enzimática varia com a massa de um tecido elevado a uma potência próxima a utilizada para o cálculo de peso metabólico. Matematicamente, $PROTSYN \propto DNA^{0.73}$ e $PROTDEG \propto PROT^{0.73}$. O modelo ajusta a síntese, mas não a degradação de proteínas para o nível nutricional. O “turnover” protéico é calculado pelas seguintes equações:

$$PROTSYN = K_2 DNA_i^{0.73} NUT_2, \quad (13)$$

$$PROTDEG = K_3 PROT, \quad (14)$$

onde DNA e PROT são as massas de DNA e proteína do animal, respectivamente, K_2 e K_3 são parâmetros. NUT_2 é calculado pela equação 16 e estima os efeitos da restrição energética sobre as taxas de deposição de

proteína. Após testar o ajuste de diversas funções lineares e não-lineares para NUT_1 e NUT_2 , Oltjen et al. (1986) chegaram as seguintes equações:

$$NUT_1 = -0,7 + 1,7P, \quad (15)$$

$$NUT_2 = 0,83 + \frac{0,2P}{0,15 + P}, \quad (16)$$

onde:

$$P = \frac{IEM}{IEMNORM}, \quad (17)$$

IEM é a ingestão de energia metabolizável e,

$IEMNORM$ é a ingestão de energia metabolizável de referencia, dada por:

$$IEMNORM = PV_Z^{0,73} (0,4380 - 0,2615 PV_Z/PV_ZM) \quad (18)$$

PV_Z é o peso vazio, calculado a partir das quantidades de gordura (G) e proteína (PROT) de acordo com a equação 19,

$$PV_Z = G + PROT/0,2201, \quad (19)$$

e PV_ZM é o peso vazio na maturidade (750 kg para machos castrados de raças britânicas; Oltjen et al., 1986).

A taxa de deposição de gordura é função do resíduo energético, após gastos com manutenção e deposição de proteína terem sido alocados. Assim, a taxa de deposição de gordura é calculada dividindo-se a quantidade de energia residual pelo valor energético médio de lipídios, conforme a equação 20:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\left[\left(\frac{IEM - EM_{MANT}}{ELm} \right) ELg - VE_{prot} \frac{dPROT}{dt} \right]}{VE_{Gord}}, \quad (20)$$

onde G é a massa de gordura, EM_{MANT} é a exigência de energia metabolizável para manutenção (equação 9), ELm e ELg são as eficiências de uso da energia metabolizável para manutenção e ganho; VE_{prot} e VE_{gord} são os valores energéticos de proteína e gordura $VE_{prot} = 5,4$ Mcal/kg e $VE_{gord} = 9,5$ Mcal/kg, respectivamente.

Como a taxa de deposição de proteína ($dPROT/dt$) é desacelerada, com a maturidade do animal (Figura 1), uma quantidade cada vez maior de gordura é particionada para ganho nesse modelo. O “turnover” de gorduras, entretanto, não é considerado.

A não ser em condições de extrema restrição energética, as equações 15 e 16 determinam uma redução muito mais severa nas taxas de deposição de DNA do que na deposição de proteína (Figura 2). O modelo assume que redução na multiplicação celular precede à redução na deposição de proteína.

Figura 2 - Efeito estático da restrição energética sobre a taxa de deposição de DNA e proteína e sobre a síntese protéica como calculado pelas equações 15 e 16.

A forma com que o modelo trata o “turnover” protéico faz com que a taxa de deposição de proteína seja controlada por um equilíbrio com a massa de DNA. Assim para cada nível de DNA existe um nível de proteína onde a taxa de deposição de proteínas é nula ($PROT_E$), definido pela equação 21, deduzida no Apêndice 2.

$$PROT_E = DNA \left(\frac{K_2 NUT_2}{K_3} \right)^{1,37} \quad (21)$$

A equação 21 implica na existência de uma quantidade máxima de proteína ($PROT_{max}$) que pode ser depositada no organismo na maturidade. Essa quantidade é equivalente a $PROT_E$ quando $DNA = DNAMX$. Também se pode deduzir que quanto mais distante o nível de proteína atual no organismo do nível de equilíbrio ($PROT_E$), maior é a velocidade de deposição (Equação 22, dedução no Apêndice 2).

$$V_p = K_3 (PROT_E - PROT)^{0,73} \quad (22)$$

A quantidade de proteína é, portanto, “forçada” a seguir um trajeto semelhante àquele da curva de DNA.

Ganho compensatório é acomodado apenas pela diferença de maturidade de animais restritos e alimentados para atingir o potencial produtivo. Como demonstrado na Figura 3, animais sob restrição energética depositam uma menor quantidade de DNA que animais não submetidos à restrição. Como a taxa de deposição de DNA diminui com a quantidade de DNA do animal (equação 11), as taxas de deposição de DNA e proteína, em um mesmo nível nutricional, são maiores para os animais com menor quantidade de DNA (submetidos à restrição alimentar ou mais jovens). Animais submetidos ou não à restrição energética convergem para o mesmo peso adulto livre de gordura (igual à $Prot_{Max}/0,2201$).

Comparando simulações de animais submetidos a uma restrição energética correspondente a 25% da ingestão potencial, nota-se que a deposição de proteína e o ganho de peso de animais (previamente sob restrição e então realimentados) são muito similares ao ganho dos animais alimentados *ad libitum* quando comparados ao mesmo peso (Figuras 3 a 5).

Os resultados indicam, entretanto, que o mecanismo utilizado no modelo de Oltjen para simular ganho compensatório atua lentamente, enquanto que o ganho compensatório parece depender de fenômenos que atuam a curto prazo como: a redução das exigências de manutenção e o maior consumo de alimentos de animais quando submetidos à realimentação (Ryan, 1990; Sainz et al. 1995). Esses fenômenos são contemplados no modelo proposto nesse trabalho.

Figura 3 - Ganho de peso em animais consumindo 100 e 75% (até dia 250 de simulação) do potencial para ingestão de energia em relação ao seu peso vivo.

Figura 4 - Deposição de proteína de animais consumindo 100 e 75% (até dia 250 de simulação) do potencial para ingestão de energia em relação ao seu peso vivo.

Figura 5 – Ganho de peso de animais consumindo 100 e 75% (até dia 250 de simulação) do potencial para ingestão de energia em relação ao seu peso vivo.

3.2.3 Integração da Ingestão aos processos de Metabolismo e Crescimento

3.2.3.1 Dinâmica Energética

Vetharaniam et al. (2001), propõem uma reserva de energia absorvida lábil (L), a qual age como um tampão entre o fluxo de energia ingerida e o fluxo de energia utilizada no metabolismo.

A reserva lábil, L, representa a capacidade do sangue e órgãos de reserva, como o fígado, estocarem energia para ser consumida quando o influxo de energia for um suficiente para manter taxas adequadas dos processos metabólicos. A reserva de energia lábil possui como fonte a energia ingerida pela dieta e a mobilização de tecidos, e como drenos o gasto de energia com manutenção, deposição de tecidos, gestação e produção de leite. Utilizando como material de interesse bovinos em crescimento e engorda restringimos os drenos à manutenção e deposição de tecidos (Figura 6).

Vetharaniam et al. (2001) utilizaram o conceito de energia absorvida como forma de expressar a reserva de energia lábil e cálculo de perdas de energia na urina de forma a permitir conversão de energia metabolizável e energia absorvida. No presente trabalho, entretanto, define-se L em unidades de energia metabolizável. Apesar de atratividade conceitual da utilização de energia absorvida, a adoção de energia metabolizável facilita a compatibilidade com o modelo de Oltjen et al. (1986), aqui utilizado e outros modelos tradicionais de nutrição animal.

L possui limite superior proporcional a massa corporal do animal, expressa aqui peso vazio (PV_z), de forma que:

$$L_{\max} = \rho PV_z, \quad (23)$$

onde $L_{\max}$ é o limite superior da reserva lábil e ρ é uma constante de proporcionalidade (parametrizada por Vetharaniam et al. (2001) como $\rho = 0,041$ MJ/kg PV).

Figura 6 – Fluxos de energia (linhas cheias) e informação (linhas pontilhadas) no modelo proposto no presente trabalho.

A reserva lábil é alimentada pela ingestão de nutrientes e pelo catabolismo (mobilização) de tecidos, enquanto a deposição de tecidos e a utilização de energia para o metabolismo de manutenção são drenos energéticos para esse “pool” (Figura 6). A dinâmica da reserva lábil é calculada como:

$$\frac{dL}{dt} = IEM - EM_{MANT} - \left(\frac{dG}{dt} \cdot VE_{Gord} - \frac{dProt}{dt} \cdot VE_{Prot} \right) / k_g, \quad (24)$$

onde IEM é a ingestão de energia metabolizável, $\frac{dG}{dt}$ é a taxa de deposição de gorduras, $\frac{dProt}{dt}$ é a taxa de deposição de proteínas, EM_{MANT} é a exigência de energia metabolizável para manutenção, e k_g é a eficiência energética de uso de energia metabolizável para ganho de peso, calculada como:

$$K_g = \frac{EL_g}{EM} = 1,42 - 0,174EM + 0,0122EM^2 - \frac{1,65}{EM} \quad (25)$$

3.2.3.2 Potencial fisiológico de uso de energia

Weston (1996) e Vetharaniam et al. (2001) postularam que animais possuem um potencial fisiológico para utilizar energia em diferentes processos metabólicos. Observa-se que o aumento no potencial fisiológico de utilização de energia, devido à mudança do estágio fisiológico (e.g. lactação) ou do uso de modificadores de metabolismo (e.g. implantes, hormônio de crescimento) acarretam elevação na taxa de ingestão de matéria seca (Forbes, 1994; Weston, 1996). Segundo Weston (1996), o aumento da demanda metabólica de energia pode ainda elevar as taxas de ingestão de matéria seca de animais sujeitos a uma restrição de ordem física, como enchimento ruminal. Em pastagens também tem sido demonstrado que o aumento da demanda metabólica ou a restrição alimentar (através do jejum) promovem aumentos no tempo ou o esforço de pastejo (Cazcarra & Petit, 1995). Define-se aqui, uma demanda metabólica EM_{max} , que constitui-se na taxa máxima de metabolização de energia pelo animal, expressa em unidade de energia metabolizável. O potencial de utilização de energia de animais em crescimento e engorda pode ser calculado como:

$$EM_{max} = EM_{MAINT} + \left(\frac{dG_{max}}{dt} \cdot VE_{Gord} - \frac{dProt_{max}}{dt} \cdot VE_{Prot} \right) / k_g \quad (26)$$

onde EM_{max} é o potencial de utilização de energia pelo animal.

Segundo Conrad (1966) e Mertens (1994), o potencial anabólico determina a ingestão máxima de energia do animal. O NRC (1996) propõe uma

equação (27) relacionando concentração de energia líquida de manutenção e ingestão.

$$IDMS = \begin{cases} PV_j (0,2435ELm - 0,0466ELm^2 - 0,1128) & \text{para bezeros} \\ PV_j (0,2435ELm - 0,0466ELm^2 - 0,0869) & \text{para sobreanos} \end{cases} \quad (27)$$

Determinando-se o ponto de máximo dessas equações (derivada primeira = 0, derivada segunda < 0), temos que $EM_{\max} = 0,205291$ MCal ME/kg $PV_j^{0.75}$ para bezeros e $EM_{\max} = 0,231191$ MCal ME/kg $PV_j^{0.75}$ para castrados e fêmeas sobreano. Esse valor pode ser utilizado para animais com PV_z até 350 kg. A partir desse peso o NRC (1996) recomenda fatores de correção para os níveis de ingestão. Estabeleceu-se um desconto contínuo para pesos superiores à 350 kg, de forma que $EM_{\max}$ pode ser descrito como:

$$\begin{cases} EM_{\max} = 0.2053 & \text{bezerro} \\ EM_{\max} = 0.2312 & PV_j \leq 350 \\ EM_{\max} = 0.2312(1 - 1.22 \cdot 10^{-3}(PV_z - 350)) & PV_j > 350 \end{cases} \quad (28)$$

O potencial de deposição de proteína pode ser determinado através do próprio modelo de Oltjen atribuindo $NUT_2 = 1$ na equação 8 e determinando o potencial de deposição de proteína temos que:

$$EM_{dprotmax} = (K_2 DNA^{0.73} - K_3 PROT) \cdot \frac{VE_{Prot}}{k_m} \quad (29)$$

No presente trabalho, considera-se que a deposição potencial de gordura é modificada pelo estado atual do animal em termos de reservas de energia lábil e tecido adiposo. O status da reserva de tecido adiposo é considerado através da condição corporal do animal. Para isso calcula-se uma relação entre a quantidade de gordura do animal (G) e a massa de gordura do animal em

condição corporal 6 com mesmo peso. Essa relação é aqui denominada razão de gordura (G/G_6). Assumindo redução linear do potencial de anabolismo de gordura com a razão de gordura (G/G_6), obtém-se a seguinte forma funcional:

$$EM_{dgord\max} = EM_{\max} (1 - (1,75G/G_6 - 1)) - EM_{dProt\max} - EM_{MANT} \quad (30)$$

A relação entre condição corporal e porcentagem de gordura é dada por Oltjen et al. (2000) pela seguinte equação:

$$\%G = 0,333 + 0,0833CC \left(\frac{PV_j - 54,6}{8,26 + 0,01PV_j} \right) \quad (31)$$

Pode-se então deduzir equações para cálculo da porcentagem de gordura em condição corporal 6 e a condição corporal do animal a partir da porcentagem de gordura:

$$\%G_6 = 0,8328 \left(\frac{PV_j - 54,6}{8,26 + 0,01PV_j} \right) \quad (32)$$

$$CC = 12,005 \cdot \left(\frac{\%G(8,26 + 0,01PV_j)}{PV_j - 54,6} - 0,333 \right) \quad (33)$$

Variações na intensidade de fluxo nas fontes e drenos podem, sem a operação de mecanismos de retroalimentação, levar à exaustão das reservas de energia lábil. Os controles de fluxo podem ser realizados ambos nos fluxos de entrada e saída. A restrição dos fluxos de saída tem sido minuciosamente modelada em outros trabalhos (DiMarco & Baldwin, 1989; Sainz & Wolff, 1990; Baldwin, 1995), nos quais a redução na quantidade de um “pool” de reserva (como glicose ou ácidos graxos voláteis) leva à redução do anabolismo de novos tecidos através da simulação da mudança na concentração hormonal e

da redução da quantidade de substrato disponível para os processos metabólicos necessários.

A redução na quantidade de energia lábil acarreta menores taxas de deposição de tecidos e o fluxo energético para esse dreno. Utilizou-se aqui um mecanismo simplificado, no qual a relação L/L_{max} substitui a variável P no cálculo de NUT_1 e NUT_2 (equações 15 a 17), adequando a aplicação do modelo situações práticas de produção.

A restrição alimentar imposta para animais confinados pode ser calculada, baseado-se nas equações do NRC (1996) como sendo:

$$RIEM = \frac{0,2435ELm - 0,0466ELm^2 - 0,0869}{0,231191k_m / 0,7011} \quad (34)$$

onde $RIEM$ é a restrição na proporção à ingestão potencial de energia metabolizável;

$$k_m = \frac{ELm}{EM} = 1,37 - 0,138 \cdot EM + 0,0105 \cdot EM^2 - \frac{1,12}{EM} \quad (35)$$

A ingestão de matéria seca será então igual à:

$$IDMS = \frac{RIEM \cdot EM_{max}}{EM_{a\ limento}} \quad (36)$$

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Dinâmica do Crescimento Animal

A dinâmica do crescimento de animais foi simulada para dietas com 3 níveis energéticos (62, 68 e 74% de NDT) para animais com escore de condição corporal inicial de 3,5 ou 5,5. Utilizou-se animais com peso vazio inicial de 250 kg.

Os resultados das simulações mostram maior ingestão de matéria seca nos animais mais magros com mesmo peso (Figura 7), devido ao efeito da gordura corporal sobre a ingestão. O aumento de ingestão para animais com condição corporal inicial inferior foi, no entanto, transiente, pois a composição dos animais alimentados com mesma dieta convergiu durante a simulação (Figura 8 e Figura 9).

Figura 7 – Dinâmica da ingestão de matéria seca para animais alimentados com dietas de duas densidades energéticas (62 e 74 % de NDT) e diferente condição corporal inicial (3,5 e 5,5).

Figura 8 – Dinâmica do ganho de peso vazio e condição corporal para animais alimentados com dietas de 62 % de NDT e diferente condição corporal inicial (3,5 e 5,5).

Figura 9 – Dinâmica do ganho de peso vazio e condição corporal para animais alimentados com dietas de 74 % de NDT e diferente condição corporal inicial (3,5 e 5,5).

Ao final do período simulado, os animais mais magros apresentaram taxas de crescimento reduzidas a níveis abaixo que a dos animais com condição corporal inicial superior (Figura 9). Além da dinâmica da condição

corporal, a maior maturidade dos animais magros, medida como a relação entre o nível de proteína corporal atual e à maturidade (PROT/Protmax), repercutiu em menor potencial de deposição de proteína, sendo uma das causas da maior redução de desempenho desses animais durante o período.

Os resultados ainda sugerem que animais ingressantes no período estudado com condição corporal alta podem sofrer redução no escore de condição corporal quando alimentados com dietas de baixa densidade energética, mesmo ganhando peso (Figura 8).

3.3.2 *Crescimento Compensatório*

O comportamento do modelo para condições de crescimento compensatório foi exemplificado pela simulação de situações hipotéticas. A intenção dos experimentos foi testar o comportamento e não a validade da parametrização do modelo, a qual deverá ser objeto de estudos posteriores. Bovinos de corte com peso inicial de 250 kg PV_Z e peso à maturidade de 750 kg PV_Z foram submetidos à duas concentrações energéticas (NDT = 45 e 55 %) durante períodos de restrição de 60 ou 150 dias. Animais controle receberam dieta com NDT = 72 %, mesma concentração utilizada para os animais restritos na fase de realimentação. A dinâmica do peso vazio dos animais é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Dinâmica da taxa de ganho de peso vazio estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Nenhum dos grupos atingiu compensação total em relação aos animais controle. Entretanto, os animais submetidos à restrição mais branda e curta fecharam o período simulado apenas 7,4 kg mais leves (409,5 vs. 402,1) que os animais controle, diferença que dificilmente atingiria significância em experimentos tradicionais.

Considerando a diferença de peso entre os animais controle ao final do período de restrição e ao final do período de simulação, nota-se que todos os tratamentos produziram “ganho compensatório”, uma vez que as taxas de ganho dos grupos restritos foi sempre superior ao do grupo controle durante o período de realimentação (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Ingestão de matéria seca e condição corporal estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Tratamento	IMS			Média Geral	CC Final	
	0-50 dias	51-150 dias	150-300 dias		Restrição	CC Final
Controle	6,21	6,93	6,84	6,77		6,07
ndt 45 60 dias	3,31	6,77	7,06	6,35	3,69	5,90
ndt 45 150 dias	3,31	3,74	7,38	5,53	2,82	5,47
ndt 55 60 dias	5,71	7,37	7,08	6,95	3,89	5,96
ndt 55 150 dias	5,71	6,80	7,79	7,13	3,56	5,65

Tabela 2. Peso vazio e ganho de peso estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Tratamento	Ganho de Peso Vazio			Peso Vazio			Compensação (kg)
	0-50 dias	51-150 dias	150-300 dias	50	150	300	
Controle	0,98	0,83	0,54	301,51	371,55	444,22	
ndt 45 60 dias	0,03	0,91	0,68	259,53	332,17	423,35	21,11
ndt 45 150 dias	0,03	-0,06	0,96	259,53	254,41	379,47	52,39
ndt 55 60 dias	0,51	0,94	0,62	279,82	357,33	439,82	17,29
ndt 55 150 dias	0,51	0,45	0,82	279,82	318,12	426,23	35,44

Entretanto, quando comparando as taxas de ganho ao mesmo peso, as diferenças se atenuam (Figura 11). As maiores respostas se deram para animais submetidos a restrições brandas e longas (NDT = 55 % por 150 dias).

Figura 11 – Taxa de deposição de proteína estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Figura 12 – Ingestão de matéria seca estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Houve necessidade de maior tempo para recuperação das taxas de ganho dos animais submetidos à restrição mais severa (NDT = 45 %), os quais apresentam ganhos inferiores na faixa de peso de 250 e 270 kg PV₂. No modelo

esse fenômeno ocorre devido à redução da hiperplasia (deposição de DNA) e aumento da relação proteína/DNA nas restrições mais severas (Figura 13). Esse fenômeno repercute em um maior tempo para a recuperação das taxas de deposição de proteínas (Figura 11) após a realimentação.

A deposição de proteína ligeiramente superior, observada para os animais restritos (Figura 11), é função da manutenção de um maior nível de energia lábil no período de realimentação (Figura 16).

Figura 13 – Relação proteína/DNA estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

A porcentagem de gordura no ganho foi modificada pela restrição nutricional. Entretanto, durante o período de realimentação, as diferenças de composição do ganho tenderam a se esvaír rapidamente (Figura 14), fazendo com que os animais convergissem para uma mesma composição corporal (Figura 15).

Figura 14 – Porcentagem de gordura no ganho estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Figura 15 – Escore de condição corporal (escala de 1 a 9) estimado pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Figura 16 – Reserva de energia lábil estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

Figura 17 – Ingestão de matéria seca estimada pelo modelo para cinco estratégias de alimentação.

3.4 CONCLUSÕES

Resultados de simulações mostram que os conceitos utilizados capacitaram a previsão da dinâmica do ganho de peso com o avanço da maturidade (usualmente a taxas decrescentes) e dinâmica das taxas de ingestão de matéria seca com o tempo.

O modelo respondeu com aumento das taxas de ganho e ingestão após períodos de restrição alimentar. A intensidade e a duração da compensação de ganho foram afetadas pela intensidade e duração da restrição. O modelo mostrou desejável tendência a um equilíbrio em composição e condição corporal para determinado peso do animal e densidade energética da dieta.

As características do presente modelo são desejáveis para estimar estratégias ótimas para sistemas de produção de bovinos de corte, particularmente quando a previsão da dinâmica de crescimento e a ingestão são de interesse como na determinação do ponto ótimo de abate de animais em confinamento. O modelo descrito é aplicado a otimização de bovinos de corte em confinamento no capítulo subsequente.

4 OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DA ENGORDA CONFINADA DE BOVINOS DE CORTE

RESUMO

O planejamento da atividade de engorda confinada de bovinos de corte inclui decisões complexas tais como o número de animais a confinar, quando iniciar o confinamento, qual o peso do animal no início do confinamento, formulação e balanceamento da ração, melhor data de venda dos animais. Para avaliar a melhor combinação desses fatores, um modelo matemático dinâmico expresso através de equações diferenciais e integrado utilizando o método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem foi utilizado para simular o crescimento de bovinos e determinar o ponto ótimo de abate. A composição da dieta foi otimizada utilizando-se programação linear. Utilizou-se simultaneamente simulação dinâmica, programação linear e um algoritmo genético para determinar soluções para um problema abrangente de otimização de confinamento de bovinos de corte, incluindo o número de animais a confinar, a data para o início do confinamento, o peso inicial dos animais a serem confinados, composição da dieta e data de venda, sujeitos à restrição de capital e quantidade de forragem. Os resultados das simulações e otimizações mostraram que o peso de abate e a extensão do período de confinamento foram afetados pelo custo da dieta, de forma que as dietas mais caras

demandaram confinamentos mais curtos e pesos de abate mais baixos. Dietas de custo mínimo de produção não produziram necessariamente máximo retorno econômico em condições de estacionalidade de preços pagos pelos animais. Épocas de compra e venda constituíram-se em um dos mais importantes aspectos para atingir o máximo retorno econômico. Quando restrição na quantidade de forragem foi imposta as estratégias ótimas incluíram maiores pesos dos animais adquiridos, compra tardia, menores períodos de confinamento e maior densidade energética na dieta, porém a data de abate foi mantida. O uso simultâneo de programação linear para otimização de dietas, simulação dinâmica e um algoritmo genético gerou soluções robustas para o problema genérico de otimização de confinamento considerado.

SUMMARY

Strategic decisions to increase the profitability in feedlot operations such as number of animals, initial body weight, commence and end of the feeding period, and diet composition are required. A dynamic mathematical model of animal growth, integrated using the fourth order Runge-Kutta method was developed to simulate several growth scenarios of beef cattle production. The simulation was used to determine the optimal slaughter date. Ration composition was optimized using linear programming and dynamic simulations. Linear programming and a genetic algorithm running concurrently was used to determine solutions of an extensive optimization problem subject to constraints of capital and feed availability. Analyses of the simulations and optimizations results' indicated that both the body weight at slaughter and the extension of the feedlot period were affect by the cost of the ration. Increasing the feed costs lowered the slaughter weights and shortened the feeding periods. Diets with the lowest production cost did not produce the maximum economical return given the conditions of beef prices. The date of purchase and sale were one of the most important aspects in reaching maximum economical return. When forrage limitation was included in the problem the solutions tended to have later

purchase, heavier animals, shorter feeding period, and(or) higher energy density in the diet. Slaughter date was however unchanged. The combination of a genetic algorithm, linear programming to diet optimization and dynamic simulation was able to generate robust solutions to the general feedlot problem.

4.1 INTRODUÇÃO

O planejamento da atividade de confinamento de bovinos de corte compreende decisões estratégicas sobre: (I) o número de animais a confinar, (II) o peso inicial dos animais, (III) a época para o início do confinamento, (IV) a dieta a ser fornecida, e (V) a época de venda dos animais.

Embora existam modelos matemáticos bem definidos das respostas do sistema de produção de animais em confinamento a tais variáveis de decisão (AFRC, 1993; NRC, 1996), a determinação da combinação ótima dos valores dessas variáveis não é trivial. A complexidade de tal problema decorre, das interações entre as variáveis na determinação das respostas biológicas e econômicas do sistema e das formas funcionais não lineares do sistema e da forma não-linear dessas respostas. A solução analítica para problemas envolvendo sistemas de equações não lineares é extremamente difícil (Garcia, 1997). Por outro lado é inviável determinar-se o conjunto ótimo de valores para essas variáveis utilizando apenas análise de sensibilidade ou busca aleatória.

Devido às complexidades na solução de problemas abrangentes de otimização da atividade de confinamento, tem-se estruturado problemas simplificados pela adoção de valores fixos para algumas das variáveis de decisão mencionadas, ou pelo tratamento de tais variáveis como dados de entrada do problema.

O problema de minimização do custo da matéria seca (MinCMS) da dieta (Scott & Broadbent, 1972), por exemplo, assume que decisões como padrão genético, peso inicial e final dos animais, época de confinamento e desempenho a ser atingido, foram tomadas a priori. Porém, possui vantagem de permitir solução através de programação linear.

Por outro lado, tem-se avançado em modelar e otimizar o ponto ideal de abate (Martin & Pires, 1975; Amer et al., 1994). O modelo de Martin & Pires (1975) permite solução analítica do problema de determinação do período ótimo de confinamento. Essa solução analítica requer, entretanto, definição de funções empíricas de produção e custos do confinamento em relação ao tempo. Martin & Pires (1975) utilizaram uma função quadrática para o peso dos animais ao longo do tempo e uma função linear para modelar a evolução do custo de produção. Funções empíricas não se enquadram bem para o desenvolvimento de sistema de apoio à tomada de decisão, pois requerem parametrização para cada condição específica do sistema de produção. Amer et al. (1994) calcularam crescimento animal baseado nas equações de Fox et al. (1988) para determinar o ponto ótimo de abate de diferentes genótipos de bovinos, porém, se restringiram a tal análise.

O desenvolvimento de métodos numéricos para otimização simultânea de sistemas não lineares é uma área em intenso progresso (Mayer et al., 1996), e possui potencial para auxiliar a resolução de problemas complexos como a otimização de atividades de produção animal, incluindo confinamento de bovinos de corte.

Ferreira (1993), Beltrame Filho et al (1997) e Resende Filho (1997) utilizaram planilha eletrônica para otimização de sistemas de confinamento. Beltrame Filho (1997) trabalhou na solução do problema de otimização de dietas para custo mínimo do ganho de peso (MinCGP) para animais de grupo genético e pesos fixos de aquisição e abate, ao passo que Resende Filho (1997) otimizou o retorno econômico de confinamentos com data de início e grupo genético pré-definidos. Beltrame Filho et al. (1997), Resende Filho (1997) e Barioni et al. (1999) relataram, entretanto, problemas de otimização relacionados à ocorrência de ótimos locais em função dos valores iniciais utilizados para as variáveis de decisão, utilizando o algoritmo de gradiente reduzido generalizado (Lasdon et al. 1978).

Segundo Mayer et al. (1996) ocorrem três problemas básicos para otimização de modelos de simulação: 1. funções derivadas não estão

disponíveis ao algoritmo de otimização e, portanto, necessitam ser aproximadas numericamente; 2. a maioria dos problemas possuem restrições de ordem prática que precisam ser acomodadas pelo uso de funções de penalidade ou um método de otimização restrito; e 3. superfícies multidimensionais de resposta às variáveis de decisão raramente são contínuas e convexas e podem apresentar quebras e comportamento errático. A utilização de métodos numéricos de otimização em conjunção com modelos de simulação deve, portanto, ser feita de forma criteriosa, uma vez que a capacidade de tais métodos levarem à convergência de uma solução ótima global do problema depende da habilidade na modelagem matemática e dos valores iniciais utilizados do problema Mayer et al. (1996). Algoritmos robustos de otimização, que não requerem cálculo de derivadas, ou combinações de algoritmos são tecnologias com grande potencial na solução de problemas complexos de otimização, incluindo sistemas de confinamento (Goldberg, 1989).

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um método para otimização simultânea de dieta, período de confinamento e número de animais a serem confinados através da utilização de algoritmos lineares e não-lineares.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Otimização da dieta

Os gastos com alimentação superam 70% dos custos totais em confinamento de bovinos (Campos, 1992), sendo a dieta um dos principais determinantes do desempenho animal. Sua formulação, portanto, constitui-se num dos fatores que mais afeta o retorno econômico nessa atividade.

4.2.1.1 Otimização linear

O modelo tradicional de otimização de dietas coloca como função objetivo a minimização do custo por kg de matéria seca da dieta (MinCMS), sujeita à restrições de requerimentos nutricionais dos animais, normalmente colocadas como concentração de nutrientes na matéria seca e níveis máximos e mínimos de alimentos (Scott & Broadbent, 1972; Boin, 1988). A forma tradicional do problema de formulação de rações de custo mínimo da matéria seca é:

$$\text{Minimizar } Z_1 = \sum_i P_i A_i \quad (37)$$

Sujeito a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i N_{ij} A_i > E_j \\ \sum_i N_{ij} A_i < T_j \\ A_i > Mn_i \\ A_i < Mx_i \\ \sum_i A_i = 1 \\ A_i \geq 0, \end{array} \right.$$

em que P_i é o preço do i -ésimo alimento, \$/kg DM; A_i é a proporção do i -ésimo alimento na matéria seca, N_{ij} é a concentração do j -ésimo nutriente ou elemento de interesse no i -ésimo alimento, E_j é a exigência nutricional do j -ésimo nutriente em base da matéria seca, definidas as características do animal em questão, T_j é o nível máximo do j -ésimo nutriente, Mn_i e Mx_i são respectivamente os níveis mínimos e máximos desejados para o i -ésimo alimento na formulação e Z_1 é a função objetivo, que consiste em minimizar o custo da dieta $\left(\sum_i P_i A_i \right)$.

Dessa forma, o problema de MinCMS pode ser resolvido através de programação linear assumindo que as exigências (E_j) são constantes.

Entretanto, mudanças na composição da dieta causam variação na ingestão de alimentos e no desempenho dos animais, modificando a concentração exigida para diversos nutrientes na matéria seca (E_j) e os custos de produção da dieta. Assim, para cada nível de ganho de peso, ingestão da matéria seca e densidade energética da dieta, existe um valor de E_j adequado e, portanto, a solução do problema de MinCMS não converge necessariamente para o mínimo custo de produção ou máximo retorno econômico.

Como grande parte dos modelos de nutrição animal definem a ingestão de matéria seca e o ganho de peso a partir da concentração energética da dieta, é possível associar os níveis de E_j à exigência de concentração energética da dieta (E_ε), para um determinado nível de ganho. A concentração energética, ε , sendo expressa de acordo com o modelo de crescimento utilizado (NDT, EM, NEm, etc.).

Barioni et al. (1999) utilizaram o modelo do sistema NRC para definir as restrições E_j para o problema de MinCMS com níveis crescentes de E_ε , medida como concentração de NDT na dieta. Assim gerou-se uma série de soluções para os níveis de NDT possíveis, custo de matéria seca, ganho de peso e o custo do ganho associado. Figuras 1 e 2 apresentam resultados de otimizações para diferentes níveis de NDT na dieta segundo Barioni et al. (1999).

Figura 1 - Ilustração da sensibilidade do custo da matéria seca e custo do ganho à restrição do nível energético da dieta (expressos em NDT), problema de minimização do custo da matéria seca.

Figura 2 - Ilustração da sensibilidade das soluções do problema de minimização do custo da matéria seca à restrição do nível energético da dieta (expressos em NDT).

A solução do problema de minimização do custo de alimentação por unidade de ganho de peso pode ser identificada entre as soluções de

minimização do custo da matéria seca. Assim, o problema não linear de minimização do custo de alimentação por unidade de ganho de peso pode ser resolvido através de um determinado valor fixo para o desempenho animal fixo e(ou) para a quantidade de energia da dieta.

4.2.1.2 Otimização não linear

Hertzler et al. (1988) descreve dois tipos de formulações de dietas não lineares: dietas de custo mínimo por ganho de peso ou carcaça, ou dietas de máximo retorno econômico. As dietas de custo mínimo por unidade de ganho de peso vivo ou de carcaça podem ser descritas como:

$$\text{Minimizar } Z_2 = \frac{\text{IMSA} * \sum_i P_i A_i}{\text{PV}_f - \text{PV}_i} \quad (38)$$

Sujeito a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i N_{ij} A_i > E_j \\ \sum_i N_{ij} A_i < T_j \\ A_i > Mn_i \\ A_i < Mx_i \\ GMD (>, <, =) R_{GMD} \\ \sum_i A_i = 1 \\ A_i \geq 0, \end{array} \right.$$

onde IMSA é a ingestão de matéria seca acumulada durante o período de confinamento; PV_i e PV_f representam o peso vivo inicial e final, respectivamente; GMD é o ganho médio diário dos animais em confinamento e R_{GMD} é a restrição para o ganho médio diário.

Alternativamente pode-se dividir numerador e denominador da função Z_2 pelo tempo de confinamento ($t_c = t_f - t_i$) e reescrevê-la como:

$$Z_2 = \frac{\text{IDMS} \sum_i P_i A_i}{\text{GMD}}, \quad (39)$$

onde IDMS é a ingestão média diária de matéria seca $\text{IDMS} = \frac{\text{IMSA}}{(t_f - t_i)}$ e GMD é

o ganho médio diário $\left(\text{GMD} = \frac{PV_f - PV_i}{t_f - t_i} \right)$.

Como o preço da arroba é definido pelo mercado e não conhecido a priori, a minimização do custo do ganho é equivalente a maximização da margem de lucro por ganho de peso, isto é:

$$\text{Minimizar } Z_2 = \text{Maximizar } Z_3 = \Omega(PV_f(\varepsilon) - PV_i(\varepsilon)) - Z_1(\varepsilon), \quad (40)$$

onde Ω é o preço pago pelo produto com base no seu peso.

Para qualquer preço do produto final Ω , a margem de lucro por unidade do produto será máxima quando Z_2 for mínimo, fixados o preço de aquisição e os pesos inicial e final dos animais e desconsiderando-se os custos exceto alimentação.

Como as exigências nutricionais variam com o desempenho animal e ingestão de matéria seca de alimentos, podemos definir CMS (GMD, IMS) como o custo da matéria seca da dieta associada a um ganho de peso GMD e ingestão diária de matéria seca IDMS. Pode-se ainda definir $\text{CMS}(\varepsilon)$ como o custo matéria seca da dieta, $\text{IDMS}(\varepsilon)$ como a ingestão diária de matéria seca e $\text{GMD}(\varepsilon)$ como o ganho de peso, dado nível energético ε . As funções objetivo Z_1 e Z_2 reduzem-se então a:

$$Z_1 = CMS(\varepsilon) \quad (41)$$

$$Z_2 = \frac{IMSA(\varepsilon) * CMS(\varepsilon)}{GMD(\varepsilon)} \quad (42)$$

Nota-se da equação (42) que o problema de minimização do custo da matéria seca é parte do problema de minimização do custo de produção e que $CMS(\varepsilon)$ mínimo é condição para minimização de Z_2 , pois para qualquer valor de ε existe um par de valores $[IDMS(\varepsilon), GMD(\varepsilon)]$, associados. Deduz-se, então, que Z_2 será mínimo apenas se $CMS(\varepsilon)$ também for mínimo. Avaliando o problema para todo ε viável, determina-se a solução do problema. Assim a série de soluções lineares utilizada por Barioni et al. (1999) aproxima a solução de problemas de minimização do custo de alimentação do ganho de peso com precisão crescente com redução dos intervalos de variação da restrição de concentração energética, $\Delta\varepsilon$.

Para resolução da série de problemas de minimização do custo de matéria seca é necessário estabelecer os limites de ε para os quais a solução do problema é viável. Na versão 2.0 do software RLM de formulação de rações (Lanna et al., 1999), a obtenção do intervalo de soluções viáveis é determinada através do seguinte protocolo:

Protocolo 1:

1. Minimizar custo da matéria seca da dieta para um $E\varepsilon$ pequeno (denominado $E\varepsilon_L$), abaixo da faixa de interesse (No programa RLM 2.0, $E\varepsilon_L = 50$ (NDT)).
2. Se houver folga na restrição $E\varepsilon$ (denominada $fE\varepsilon$) para a solução do problema em 1, isto é, se ε na solução do problema em Z_1 for maior que $E\varepsilon$, a série de soluções viáveis se inicia em $E\varepsilon_i = E\varepsilon_L + fE\varepsilon$ senão $E\varepsilon_i = E\varepsilon_L$.

3. Procede-se aumentos discretos da variável ε com intervalos $\Delta\varepsilon$ (no programa RLM 2.0 $\Delta\varepsilon = 1$) até que a solução não seja mais possível.

Um segundo protocolo para aproximação dos limites de ε , desenvolvido nesse trabalho é apresentado abaixo.

Protocolo 2:

1. Define-se uma matriz para um problema de programação linear na qual o nível de NDT aparece na função objetivo Z_4 , e as restrições de níveis protéicos e outros nutrientes são definidas em relação ao nível de NDT.

$$Z_4 = \sum_i A_i \varepsilon_i \quad (43)$$

Sujeito a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i A_i \varepsilon_i + \varepsilon_{dieta} = 0 \\ \sum_i N_{ij} A_i + R \varepsilon_j \varepsilon_{dieta} > E_j \\ \sum_i N_{ij} A_i < T_j \\ A_i > Mn_i \\ A_i < Mx_i \\ \sum_i A_i = 1 \\ A_i \geq 0, \end{array} \right.$$

2. Obtêm-se os níveis mínimos e máximos de NDT da dieta pela minimização e maximização de Z_4 .
3. Como a exigência de alguns nutrientes varia com o nível de energia da dieta (particularmente proteína), procede-se uma aproximação por interpolação linear das exigências entre 3 níveis arbitrários de ε . No caso do modelo proposto nesse trabalho, as exigências foram determinadas

para níveis 52, 70 e 85 para o NDT. Erros na determinação dos limites de densidade energética devido à interpolação linear das exigências são negligíveis (Figura 3)

Figura 3 – Comparação entre exigência de proteínas calculada pontualmente para cada nível de NDT e interpolada linearmente.

No caso da solução de um problema de MinCMS, para um nível de E_ε existe a possibilidade de uma solução com $\varepsilon_s > E_\varepsilon$ cujo custo da matéria seca é menor do que o obtido quando $\varepsilon_s = E_\varepsilon$. Assim é possível identificar uma fronteira de soluções eficientes em níveis de ε denominada FEE para os quais não existe uma dieta com energia mais elevada e menor custo de matéria seca. FEE obviamente está inserida na amplitude de valores de ε ($\varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \in \text{FEE} \leq \varepsilon_{\max}$). O valor máximo de energia que geram soluções viáveis na fronteira é ε_{efm} , é sempre igual à $\varepsilon_{\max}$, uma vez que não é possível existir um valor de densidade energética superior e custo mais baixo que $\varepsilon_{\max}$. Assim o protocolo 1 identifica ε_{efn} e $\varepsilon_{\max}$, enquanto o protocolo 2 identifica $\varepsilon_{\min}$ e $\varepsilon_{\max}$. Uma modificação no protocolo 2 permite a identificação da densidade energética mínima eficiente.

Após a determinação de $\varepsilon_{\min}$ executam-se os passos 1 e 2 do protocolo 1, atribuindo o valor de $\varepsilon_{\min}$ à $E_{\varepsilon L}$.

4.2.2 Otimização em dupla camada de dietas de custo mínimo de produção.

Foi demonstrado que a minimização do custo da matéria seca da dieta é requerida para a minimização do custo de alimentação por unidade de produto. e que é possível obter uma solução para esse problema examinando-se todos os possíveis níveis de energia da dieta (equação 42, Barioni et al., 1999). Assim, é possível utilizar um método numérico de otimização, em que ε é a variável de decisão e cuja função objetivo é Z_2 . Para cada nível de ε , CMS tem que ser mínimo. Podemos escrever o problema da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } Z_5 = \frac{\text{IDMS}(\varepsilon) * \text{CMS}(\varepsilon)}{\text{GMD}(\varepsilon)} \quad (44)$$

sujeito a :

$$\text{CMS}(\varepsilon) = \text{MinCMS}(\varepsilon)$$

$$\varepsilon > \varepsilon_{\text{efn}}$$

$$\varepsilon < \varepsilon_{\text{max}}$$

$$\text{GMD} (>, <, =) R_{\text{GMD}}$$

A restrição que $\text{CMS}(\varepsilon) = \text{MinCMS}(\varepsilon)$ pode ser garantida minimizando o custo da matéria seca para cada iteração do método numérico de otimização não-linear. O problema é então resolvido utilizando-se simultaneamente dois algoritmos: um algoritmo linear na “camada” interna (ou “loop” interno) que otimiza a composição da dieta para um determinado nível energético, e um algoritmo não linear na camada (ou “loop”) externa(o), como mostra a Figura 4.

Assim, o problema de minimização do custo de produção pode ser resolvido de acordo com o protocolo 3.

Protocolo 3:

1. Determinar a fronteira eficiente de ε ($\varepsilon_{\text{efn}} < \varepsilon < \varepsilon_{\text{max}}$) através do protocolo 2
2. Atribuir ε_{efn} e ε_{max} às restrições de mínimo e máximo de ε para o algoritmo não linear.
3. Estabelecer um nível inicial de $\varepsilon \in \text{FEE}$ (adotou-se aqui $\varepsilon = (\varepsilon_{\text{efn}} + \varepsilon_{\text{max}})/2$ como nível inicial de ε)
4. Executar o algoritmo de otimização não linear até as variáveis de decisão convergirem para valor ótimo:
 - a. Atribuir o valor de variáveis de decisão para o modelo matemático de nutrição e crescimento animal, para restrição E_ε do problema de MinCMS, e para cálculo da função objetivo.
 - b. Executar o modelo matemático de nutrição e crescimento para um período de confinamento pré-definido, visando obtenção da ingestão de matéria seca, do ganho de peso e das restrições relacionadas às exigências nutricionais, B_j , associadas.
 - c. Atribuir as restrições de exigências nutricionais ao problema de MinCMS e à função objetivo do algoritmo não linear.
 - d. Calcular a solução para o problema de MinCMS (camada interna de otimização)
 - e. Atribuir o valor de $\text{MinCMS}(\varepsilon)$ à função objetivo do algoritmo não linear.
 - f. Calcular o valor da função objetivo do problema externo.
 - g. Calcular o novo valor das variáveis de decisão para a iteração seguinte do algoritmo de solução do problema não linear (camada externa da otimização).

Figura 4 - Representação esquemática do método de solução de dupla camada para o problema de minimização do custo do produto marginal (Protocolo 3).

4.2.3 Ponto ótimo de abate

O período ótimo de confinamento pode ser definido como aquele que maximiza o valor presente líquido dos fluxos de caixa da atividade (Martin & Pires, 1975; Amer et al., 1994 e Resende Filho, 1997). Segundo Amer et al. (1994), o valor presente líquido da atividade de confinamento pode ser expresso como:

$$\text{VPc} = \text{VPR} - \text{VPD}, \quad (45)$$

onde VPc é o valor presente líquido da atividade de confinamento, VPR é o valor presente líquido do vetor de receitas, R, e VPD é o valor presente líquido do vetor de despesas, D.

4.2.3.1 Receitas

Considerando que a receita do confinamento provém somente da venda dos animais terminados e uma taxa de juros com capitalização contínua igual a r , o valor presente ($t = 0$) da receita será igual a:

$$VPR = \Omega(t, F_g(t)) * F_g(t) e^{-r(t+z)}, \quad (46)$$

onde $\Omega(t, F_g(t))$ é o preço em kg de peso dos bovinos confinados para tempo = t e peso vivo = $F_g(t)$. O termo $e^{-r(t+z)}$ atualiza o valor da previsão de receita para valor presente, z é o prazo para o pagamento após o fechamento do negócio, e “ e ” é a constante de Euler ($e \cong 2,7183$).

O peso de animais em confinamento possui tendência de aumentos a taxas decrescentes, isto é:

$$\frac{dF_g(t)}{dt} > 0, \quad e \quad (47)$$

$$\frac{d^2 F_g(t)}{dt} < 0, \quad (48)$$

resultando:

$$\frac{dVPR}{dt} > 0, \quad e \quad (49)$$

$$\frac{d^2 VPR}{dt} < 0. \quad (50)$$

Biologicamente, as taxas decrescentes do ganho de peso refletem: (a) o aumento da exigência de manutenção dos animais com o aumento do peso vivo; (b) o aumento da densidade energética do ganho (devido à maior deposição de gordura) com o avanço da maturidade do animal, e (c) o consumo de matéria seca tende a se reduzir quando expresso em proporção do peso metabólico ($PV^{0,75}$), particularmente quando os animais atingem peso vazio acima de 300 kg (Fox et al., 2000, Oltjen et al., 2000), de forma que a energia disponível para ganho reduz-se enquanto a densidade energética do ganho eleva-se.

4.2.3.2 Despesas

O valor presente das despesas pode ser expresso como:

$$VPD = f_d(t)e^{-rt} \quad (51)$$

onde $f_d(t)$ é a função de custo da atividade. Resende Filho (1997) inclui na função de custos:

- Custos fixos, ϕ_f (depreciação de máquinas, equipamentos e benfeitorias + custo de oportunidade da terra + manutenção de máquinas e equipamentos + juros sobre o capital médio empatado com instalações e equipamentos);
- Custos variáveis relativos ao tempo de confinamento, ϕ_t (e.g. horas-homem + horas-máquina);
- Custo de aquisição dos animais para o confinamento ϕ_0 ;
- Custos variáveis relativos ao número de animais confinados, ϕ_a (vitaminas, medicamentos, vacinas);
- Custo com arraçoamento.

A distinção dos custos variáveis em custos relativos ao número de animais, custos de alimentação e tempo de confinamento é útil na otimização de sistemas de produção de bovinos em confinamento, uma vez que se pode facilmente calcular, de forma isolada, os impactos de mudanças do tempo de confinamento e no número de animais confinados sobre os custos de produção.

Os sistemas de nutrição de ruminantes (CSIRO, 1990; NRC, 1996) admitem que a ingestão de matéria seca de alimentos aumenta com o peso dos animais, quando alimentados com dieta constante. O NRC (1996), por exemplo, considera que a ingestão de matéria seca é proporcional ao peso metabólico do animal. Em confinamentos para engorda de bovinos, os gastos com alimentação ultrapassam 70% do custo total (Martin & Pires, 1975), excetuando os custos de aquisição dos animais. Dessa forma, o aumento no consumo de alimentos com o decorrer do confinamento repercute em crescente custo de produção, de forma que $\frac{dVPD}{dt} > 0$.

Portanto, assumindo-se constantes os preços de produto e insumos, existe uma redução contínua no produto marginal com o tempo $\Omega \frac{dF_g(t)}{dt}$, enquanto o custo marginal $\frac{df_d(t)}{dt}$ inflaciona-se, particularmente devido ao aumento no consumo de alimentos.

Deduz-se que existe um ponto em $t = t_{a1}$ (tempo ótimo para o abate considerando preço fixo para os animais), no qual $\frac{df_d(t)}{dt}$ iguala $\Omega \frac{dF_g(t)}{dt}$ e VPc passa a decrescer a partir de então. O problema atende, portanto, às condições necessárias e suficientes para obter-se o valor máximo de VPc, ou seja, a existência de um ponto no tempo no qual:

$$1) \frac{dVPc}{dt} = 0 \quad (52)$$

$$2) \frac{d^2VPc}{dt} < 0, \quad (53)$$

A condição necessária 1 pode ser expressa como (Martin & Pires, 1975):

$$\frac{dVPc}{dt} = \Omega \frac{dF_g(t)}{dt} e^{-rt} - r\Omega F_g(t) e^{-rt} - \frac{df_d}{dt} e^{-rt}. \quad (54)$$

Fazendo $\frac{dVPc}{dt} = 0$ e resolvendo, temos que:

$$\Omega \frac{F_g(t)}{dt} = r\Omega F_g(t) + \frac{df_d}{dt}. \quad (55)$$

A equação (55) indica que o animal deverá ser mantido em confinamento, enquanto o valor da receita marginal $\Omega \frac{F_g(t)}{dt}$ for maior que o valor dos juros sobre o produto $r\Omega F_g(t)$ adicionado ao custo marginal $\frac{df_d}{dt}$ (Martin & Pires, 1975).

Considerando que a principal fonte de variação do custo marginal refere-se ao aumento de ingestão de matéria seca (IMS), $\frac{F_g(t)}{dt}$ é equivalente ao ganho de peso dos animais (GMD) e $F_g(t)$ o peso vivo (PV) dos animais, deduz-se que os animais deverão permanecer em confinamento enquanto:

$$\Omega GDP > r\Omega PV + IDMS \cdot CMS + t\phi_t. \quad (56)$$

Analisando a inequação (56) temos que os animais deverão permanecer no confinamento enquanto o produto entre o ganho de peso e preço do kg de ganho (ΩGMD) superar o custo de alimentação ($IMS.CMS$), acrescido do custo

diário do confinamento (ϕ_t) e dos juros sobre o valor do produto ($r\Omega PV$). Ainda, a inequação 56 pode ser traduzida para a seguinte forma:

$$\Omega > \frac{r\Omega PV + IDMS \cdot CMS + \phi_t}{GMD}, \quad (57)$$

a qual afirma que os animais deverão permanecer em confinamento enquanto o preço do produto exceder o custo marginal de produção, $\frac{r\Omega PV + IDMS \cdot CMS + \phi_t}{GMD}$.

4.2.3.3 Otimização com variação dos preços pagos pelo peso do animal

Uma das premissas das relações deduzidas anteriormente consiste de o valor da arroba Ω ser fixo em relação ao tempo. Entretanto, um fator na análise econômica de confinamentos, particularmente na situação da pecuária de corte brasileira, é a variação estacional dos preços pagos pela arroba ou kg de carcaça dos animais (Resende Filho, 1997). Igualmente, os preços praticados dependem do peso da carcaça do animal. Machos com pesos de carcaça inferiores a 15 arrobas (dependendo da região e pressão de demanda sobre a carne bovina) sofrem deságio no mercado. Assim deve-se relaxar a premissa de que Ω é fixo, considerando o preço do animal como $\Omega(t, F_g(t))$. Tal relaxamento leva a um problema de difícil solução analítica. Optou-se então pela resolução do problema através de simulação dinâmica. Adotando-se uma restrição de tempo máximo de confinamento tão grande quanto necessário (eg. $T_{max} = 180$ dias), o modelo pode ser resolvido para todo o período, permitindo obter a dinâmica de VPc como apresentado na Figura 5.

Figura 5– Dinâmica do valor presente de custos, despesas e margem bruta para diferentes períodos de confinamento.

Assim executou-se o modelo dinâmico proposto no capítulo 1, mantendo-se na memória o valor máximo de VP_c , o tempo de confinamento quando o valor máximo ocorreu e os dados sobre o estado do sistema nesse instante, até que:

$$\Omega_{\text{fut max}} < \frac{r\Omega PV + IDMS \cdot CMS + \phi_t}{GMD} \text{ ou,} \quad (58)$$

$$\Omega(t_i, PV_i) + \Phi_0 + \sum_i A_i P_i \int_t IDMS(t, \varepsilon) + \Phi_1 t \geq R_{CAP} \text{ ou,} \quad (59)$$

$$A_i \int_t IDMS \geq \frac{R_{Qu}}{NA} \quad (60)$$

Isto é, a simulação é executada até que o custo de produção seja mais elevado que o máximo preço previsto para a arroba durante o período de interesse (inequação 58), ou todo capital disponível seja utilizado (inequação 59), ou a quantidade de um alimento A_i , tipicamente um volumoso, ultrapasse

sua disponibilidade total, R_{Ai} (inequação 60), rastreando, desta forma, todo o período de interesse para determinação do ponto de abate com máximo VP_C .

4.2.4 Otimização combinada de dietas e período de confinamento

O tempo de confinamento para máximo valor presente (VP) é função do preço pago pelo produto, da ingestão de matéria seca, do custo da matéria seca e do ganho de peso do animal. Como tais variáveis, exceto preço pago pelo produto, dependem da dieta formulada, existe um tempo ótimo de confinamento e um retorno econômico associado para cada dieta (Figura 6).

Figura 6 – Relação entre renda líquida (valor presente da atividade) para animais adquiridos em 15/07/2001 com peso vivo de 300 kg e alimentados com dietas otimizadas para dois níveis de NDT.

A otimização combinada de dietas e período de confinamento pode ser resolvida utilizando-se o protocolo 3, estabelecendo como critério de parada da simulação as condições propostas nas inequações 58 a 60.

É possível expandir essa metodologia para contemplar um problema mais abrangente de otimização da atividade de confinamento como o definido em (61).

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } Z_0 = & NA\Omega(t_f, PV_f) e^{-r(t+z)} \\ & - NA \left(\Omega(t_i, PV_i) + \sum_i A_i P_i \int_t IDMS(t, \varepsilon) + \Phi_a \right) \\ & - \Phi_1 t - \Phi_f \end{aligned} \quad (61)$$

Sujeito a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i N_{ij} A_i > E_j \\ \sum_i N_{ij} A_i < T_j \\ A_i > Mn_i \\ A_i < Mx_i \\ NA(\Omega(t_i, PV_i) + \Phi_0) + \sum_i A_i P_i \int_t IDMS(t, \varepsilon) + \Phi_1 t < R_{CAP} \\ NA(>, <, =) R_{NA} \\ \sum_i A_i = 1 \\ A_i \geq 0 \\ A_i NA \int_t IDMS(t, \varepsilon) \leq R_{QII}, \end{array} \right.$$

onde NA é o número de animais a confinar, PV_i e PV_f representam o peso vivo dos animais no início e término do confinamento, respectivamente, t_i e t_f representam o tempo no início e final do confinamento, respectivamente, $\Omega(t_f, PV_f)$ e $\Omega(t_i, PV_i)$ são os preços inicial e final por kg de peso vivo do animal, respectivamente, $\sum_i A_i P_i$ é o custo do kg de matéria seca ($CMS(\varepsilon)$), $\int_t IDMS(t, \varepsilon)$ é a ingestão total de matéria seca e, R_{NA} , R_{CAP} e R_{Ai} são restrições para capacidade das instalações do confinamento (número de animais), capital

disponível e quantidade total de um alimento (A_i), respectivamente. As demais restrições como previamente definidas.

Podemos resolver o problema, colocando as variáveis NA , t_i , PVi e ε na camada externa do otimizador, utilizando programação linear para a solução de dietas ótimas e encontrando o tempo ótimo de confinamento (t_c) para a dieta formulada, utilizado procedimento anteriormente descrito (item 4.2.3.3)

4.2.4.1 Otimização com restrição na disponibilidade de volumosos

Ocorre comumente na atividade de confinamento que a quantidade de volumoso disponível é limitada. Nesse caso as opções de diminuir o número de animais, reduzir o período de confinamento ou reduzir a proporção do volumoso na dieta necessitam ser avaliadas.

A restrição para a proporção de um alimento (Mx_i) é introduzida como uma variável ao problema de otimização não linear e seu valor é passado ao problema de formulação linear de rações. Simultaneamente, a quantidade máxima a ser utilizada do alimento em questão (R_{Qn}) é utilizada como do problema não linear (equação 62).

$$A_i \cdot NA \cdot \int_t IDMS(t, \varepsilon) \leq R_{Qn} \quad (62)$$

A restrição para a quantidade total de alimento por animal $\frac{R_{Qn}}{NA}$ é também estabelecida como restrição para o ponto ótimo de abate (equação 60).

Figura 7 – Representação esquemática do método de solução de dupla camada para o problema de maximização do valor presente (Protocolo 3).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Procedeu-se a otimização de um sistema de confinamento, utilizando-se o modelo de crescimento descrito no capítulo 1. Os preços de compra e venda dos animais foram tomados do publicados pela Anualpec (2002) para o ano de 2001/2002. Lotes com peso médio de carcaça abaixo de 225 kg foram remunerados a preço de vaca gorda (deságio médio de 12%). Assumiu-se

distribuição uniforme dos pesos de carcaça do lote nos limites de ± 10 kg em relação à média para o cálculo da remuneração das carcaças.

Utilizaram-se duas cotações de preços de concentrados. A cotação “A” reflete preços médios pagos por grandes quantidades de insumos de maio a setembro de 2001, e a cotação “B” foi produzida inflacionando-se arbitrariamente os preços para análise do efeito de preços de concentrados sobre as soluções do problema (Tabela 1). Os dados de entrada para o sistema são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Preços de alimentos considerados nos experimentos de otimização do confinamento.

	Cotação “A”	Cotação “B”
Milho	140,00	230,00
Farelo de Soja	415,00	607,00
Caroço de Algodão	171,00	330,00
Cana	22,00	22,00
Uréia	490,00	660,00
Suplemento Mineral	500,00	500,00

Tabela 2. Dados de entrada do modelo para os experimentos de otimização de confinamento.

Variável	Valor	Variável	Valor
Mortalidade	0 %	Rendimento Carcaça	51 %
Perdas de cocho	0 %	Crescimento Microbiano	12.5 %
Taxa de Juros (r)	0,03 %/dia	ϕ_t	R\$ 0,16/dia
Condição Corporal	5	Prazo de pagamento	30 dias
Peso adulto	750 kg		

Com o intuito de analisar a sensibilidade do sistema, otimizou-se dietas para mínimo custo da matéria seca com diferentes níveis de restrição à concentração energética, espaçados de 1 unidade de nutrientes digestíveis totais (NDT) na amplitude de da fronteira de soluções viáveis. Cada uma das dietas otimizadas foi então utilizada para alimentar o modelo de crescimento animal (descrito no capítulo 3) e gerar estimativas de ingestão e crescimento. A Tabela 3 apresenta os resultados do procedimento descrito acima.

Tabela 3. Análise de sensibilidade do custo da matéria seca, ingestão de matéria seca, custo diário e custo do ganho para dietas otimizadas através de minimização do custo da MS para diferentes níveis de concentração energética (NDT).

TDN	Cotação A				Cotação B		
	GMD	IMS	Custo da MS		Custo da MS	Custo diário	Custo Ganho
			(R\$/t)	(R\$/dia)	(R\$/t)	(R\$/dia)	(R\$/kg GMD)
60	0,66	7,26	97,02	0,70	109,07	0,79	1,21
61	0,70	7,33	95,15	0,70	107,65	0,79	1,13
62	0,74	7,40	97,72	0,72	113,62	0,84	1,13
63	0,79	7,46	100,65	0,75	120,17	0,90	1,14
64	0,83	7,51	103,58	0,78	126,71	0,95	1,15
65	0,87	7,56	106,49	0,81	133,26	1,01	1,16
66	0,91	7,60	109,37	0,83	139,80	1,06	1,17
67	0,95	7,63	112,24	0,86	146,35	1,12	1,18
68	0,99	7,66	115,12	0,88	152,89	1,17	1,19
69	1,03	7,69	118,00	0,91	159,44	1,23	1,19
70	1,06	7,70	120,87	0,93	165,99	1,28	1,20
71	1,10	7,72	123,75	0,96	172,53	1,33	1,21
72	1,13	7,73	126,63	0,98	179,08	1,38	1,22
73	1,17	7,73	129,50	1,00	185,62	1,44	1,23
74	1,20	7,73	132,38	1,02	192,17	1,49	1,24
75	1,23	7,73	135,26	1,05	198,71	1,54	1,25
76	1,26	7,72	138,13	1,07	205,26	1,58	1,25
77	1,29	7,71	141,01	1,09	214,47	1,65	1,28
78	1,32	7,70	194,64	1,50	294,42	2,27	1,71

Observa-se da Tabela 3 que o custo mínimo de produção com preços de concentrado da cotação “A” foi de R\$ 0,836/ kg de ganho, obtido com dieta de concentração de nutrientes digestíveis entre 76 e 77. Para a cotação “B” o custo mínimo do ganho foi R\$ 1,13/ kg GMD, NDT entre 61 e 62.

O sistema de engorda confinada foi então otimizado através do protocolo 3 (otimização combinada da composição da dieta e tempo de confinamento com série de NDTs) para 3 datas de compra (15/mai, 15/jun e 15/jul) e 4 pesos dos animais na aquisição (250, 300, 350 e 400 kg PV). Os resultados das otimizações são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

4.3.1 Época e peso de entrada

As soluções enfatizam, no conjunto, que os preços pagos pelo animal na entrada do confinamento e a sintonia do peso e época de entrada do bovino no confinamento e época de pico de preços são fundamentais para obtenção de alta lucratividade. A renda líquida máxima tendeu a ocorrer para animais adquiridos em junho, quando o preço pago pela arroba era mais baixo (Tabelas 4 e 5). Quando o preço do concentrado era baixo, a combinação de entrada de animais com peso mais baixo e permanência longa no confinamento foi favorável. Para preços de alimentos mais elevados a tendência foi amenizada.

Tabela 4. Otimização combinada da composição da dieta e tempo de confinamento para diferentes datas e pesos de aquisição dos animais com preços de alimentos da cotação A.

Data Inicial	Peso Inicial	Tempo Conf. (dias)	Peso Final	NDT	VPc	Retorno ao			IMSA (kgMS/ animal)	VPc/tMS	Preço Compra (R\$/cabeça)	GMD (kg/dia)
						Capital Circulante (%)	Data Venda	Preço Venda (R\$/kg Carcaça)				
15/05	250	164	462	77	133,90	23,65	26/10	3,16	1259	106,38	367,58	1,29
15/06	250	183	484	77	146,62	25,36	15/12	3,14	1438	101,93	352,69	1,28
15/07	250	153	449	77	129,97	24,09	15/12	3,10	1157	112,30	356,30	1,30
15/05	300	154	492	77	131,90	21,22	16/10	3,18	1281	102,93	421,12	1,24
15/06	300	128	462	77	128,26	22,01	21/10	3,17	1033	124,11	419,77	1,27
15/07	300	153	491	77	119,49	19,18	15/12	3,14	1272	93,97	424,12	1,25
15/05	350	154	533	77	112,81	16,03	16/10	3,18	1392	81,06	488,12	1,19
15/06	350	123	499	77	116,99	17,86	16/10	3,18	1078	108,52	486,54	1,22
15/07	350	93	465	77	109,57	17,79	16/10	3,18	790	138,76	491,62	1,24
15/05	400	154	571	77	93,33	11,92	16/10	3,18	1494	62,45	552,95	1,12
15/06	400	123	540	77	103,85	14,20	16/10	3,18	1163	89,31	551,16	1,14
15/07	400	93	508	77	102,17	14,79	16/10	3,18	856	119,38	556,95	1,16

Tabela 5. Otimização combinada da composição da dieta e tempo de confinamento para diferentes datas e pesos de aquisição dos animais com preços de alimentos da cotação B.

Data Inicial	Peso Inicial	Tempo Conf. (dias)	Peso Final	NDT	VPC	Retorno ao Capital		Data Venda	Preço Venda (R\$/kg Carcaça)	IMSA (kgMS/ animal)	VPC/tMS	Preço Compra (R\$/cabeça)	GMD (kg/dia)
						Circulante (%)							
15/05	250	154	445,06	76	45,07	7,21		16/10	3,13	1165,72	38,59	367,58	1,27
15/06	250	169	462,25	76	54,10	8,46		01/12	3,13	1303,98	41,49	352,69	1,26
15/07	250	153	443,90	76	47,49	7,76		15/12	3,08	1156,65	41,06	356,30	1,27
15/05	300	154	461,75	71	31,64	4,68		16/10	3,18	1269,47	24,85	437,70	1,05
15/06	300	123	452,59	76	55,05	8,63		16/10	3,15	987,73	55,73	419,77	1,24
15/07	300	131	461,73	76	41,29	6,27		23/11	3,12	1061,89	38,88	424,12	1,23
15/05	350	154	461,79	64	11,48	1,65		16/10	3,18	1331,06	8,54	507,50	0,73
15/06	350	123	461,64	68	48,09	7,22		16/10	3,18	1065,98	45,11	486,54	0,91
15/07	350	93	462,56	76	54,94	8,25		16/10	3,18	790,88	69,47	491,62	1,21
15/05	400	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-
5/06	400	123	467,86	61	37,77	5,50		16/10	3,18	1101,5	34,28	551,16	0,55
15/07	400	93	464,95	64	49,22	7,27		16/10	3,18	839,94	58,60	556,95	0,70

4.3.2 Dietas

Quando utilizando concentrado de baixo custo (cotação A), as dietas convergiram para soluções de mínimo custo da arroba (NDT = 77). As dietas com alto custo de concentrado, entretanto, convergiram para NDT entre 61 e 76, com predominância dos níveis mais elevados (Tabela 4 e 5). Os níveis energéticos mais elevados foram utilizados principalmente pelos animais adquiridos mais leves e tardiamente. Essa tendência pode ser explicada pelos maiores preços pagos pelo boi em outubro. O algoritmo identificou como estratégia ótima a utilização de uma dieta com custo mais elevado por arroba engordada, porém que permitisse o acabamento do animal em uma época na qual obtivesse melhor remuneração pelo produto.

As soluções para dietas de alto custo de concentrado enfatizam a necessidade de sintonia entre a época e peso de aquisição dos animais com a concentração energética da dieta.

4.3.3 Peso de Abate e Tempo de Confinamento

O peso ótimo de abate tendeu a ser mais elevado com preços baixos de concentrado. Em virtude do aumento do custo de alimentação ser o principal fator para o aumento do custo de produção, é esperado que menores custos de aquisição de alimentos levem a um aumento mais lento do custo de produção. Dessa forma o ponto no qual o custo de produção supera a receita marginal (ponto ótimo de abate), ocorre em pesos mais elevados.

4.3.4 Otimização simultânea

O confinamento foi finalmente otimizado utilizando o problema descrito pela função objetiva descrita na equação 61. Para solução do problema utilizou-se a biblioteca de algoritmos de otimização "Solver DLL 3.5" (Frontline Systems Inc., 1999). Configurou-se a biblioteca para utilização de um algoritmo genético

para otimização da camada externa do problema (não linear) e o método simplex de solução de problemas lineares para formulação de dietas de custo mínimo da matéria seca.

Cinco problemas de otimização simultânea foram resolvidos. (a) cotação A e número fixo de animais (1000), (b) cotação B e número fixo de animais (1000); (c) cotação A com número variável de animais e restrição financeira, (d) cotação B com número variável de animais e restrição financeira, e (e) cotação B e restrição de quantidade de volumoso. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados de otimização simultânea em duas camadas do problema de otimização do confinamento.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Restrição número animais	1000	1000	800-1500	800-1500	800-1500
Restrição Capital Circulante(R\$)	-	-	800.000,00	800.000,00	800.000,00
Restrição Quantidade Cana (kg MS)	-	-	-	-	300000
Data de compra	5/6	23/6	15/6	23/6	3/7
Número de animais	1000	1000	985	1122	1037
Peso Inicial (kg PV)	250	326	250	295	333
Tempo de confinamento (dias)	193	115	175	115	105
Peso Final (kg PV)	496	462	475	463	461
NDT Ótimo	77,89	74,84	76,60	76,19	76,25
VPc	151,24	59,96	150,02	59,06	56,68
Retorno ao capital circulante (%)	23,64	8,43	23,45	8,39	8,38
Data Venda	15/12	16/10	15/12	16/10	16/10
Preço Venda (R\$/kg de carcaça)	3,14	3,18	3,18	3,18	3,18
KgMS volumoso/animal	487,64	381,21	432,23	435,54	301,93
VPc/t MS	310,15	157,29	310,15	157,29	187,72
Preço Compra (R\$/cabeça)	358,9	454,7	358,9	454,7	466,6
GMD (kg/dia)	1,27	1,19	1,23	1,23	1,22
Porcentagem de volumoso	30,8	39,7	34,0	35,8	34,9

Os resultados mostram que o método de solução, combinando programação linear e algoritmo genético foi eficiente em determinar a “região ótima” problema. Embora não seja possível garantir que as soluções sejam ótimos globais ou mesmo ótimos locais (Goldberg, 1989), essas foram

superiores àquelas encontradas na análise de sensibilidade à data e peso de aquisição (Tabelas 4 e 5).

Não houve grande alteração da solução do problema quando submetido a restrição financeira, a não ser em relação ao número de animais. Isso se explica pelas soluções com máximo valor presente possuírem também máximo retorno ao capital investido. Entretanto a restrição de quantidade de volumoso modificou a estratégia de produção. Com volumoso restrito, adquiriu-se animais mais pesados (333 vs. 326 kg) e mais tarde (3/jul vs. 23/jun) para mesma data e peso de abate. Além disso, utilizou-se dieta com concentração energética mais elevada (76,25 vs. 74,80) e com menor proporção de volumoso (34.9% vs. 39.7%). Essas mudanças de estratégia permitam a economia de aproximadamente 80 kg de matéria seca de volumoso (cana) por animal. Apesar da pequena redução no valor presente com a restrição de volumoso (56,68 vs. 59,96), houve sensível aumento no retorno por tonelada de matéria seca de volumoso (187,72 vs. 157,29)

4.4 CONCLUSÕES

As análises das simulações e soluções de otimizações em um sistema de produção de bovinos com engorda confinada mostraram que:

1. Período de confinamento e peso ideal de abate do animal são bastante influenciados pelo custo da dieta. Custos mais elevados da dieta requerendo pesos de abate inferiores e confinamentos mais curtos para um mesmo preço pago pelos animais.
2. As dietas de mínimo custo do ganho não repercutem, necessariamente, em valor presente máximo para o confinador em condições de estacionalidade de preços. Os resultados indicam que tão importante quanto determinar baixo custo de produção é que as dietas devem proporcionar ganhos que permitam abate do animal em época e peso adequados para possibilitar máxima remuneração.
3. Um dos fatores mais importantes para otimização da lucratividade do confinamento em mercados com estacionalidade de preços é a compra de animais em época e pesos adequados para que o animal possa ser comercializado durante épocas onde a remuneração pelo produto seja mais vantajosa.
4. Em sistemas com restrição na quantidade de volumoso, o valor presente por unidade de volumoso se apresentou como um índice melhor que o valor presente por animal como indicador de estratégias otimizantes.
5. A combinação de um algoritmo genético, otimização de dietas utilizando o método Simplex e simulação dinâmica de crescimento animal gerou soluções robustas para um problema abrangente de otimização de sistemas

de engorda confinada, permitindo identificar estratégias ótimas para diferentes cenários de preços e sistemas de produção.

5 CONCLUSÕES

Resultados de simulações mostram que a introdução de respostas dinâmicas ao estado do animal capacitou a previsão das mudanças nas taxas de ganho de peso com o avanço da maturidade as respostas em taxa de ingestão de matéria seca. O modelo simulou satisfatoriamente ganho compensatório, respondendo com aumento das taxas de ganho e ingestão à períodos de restrição alimentar. A intensidade e a duração da compensação de ganho foram afetados pela intensidade e duração da restrição. O modelo mostrou desejável tendência a um equilíbrio em composição e condição corporal para determinado peso do animal e densidade energética da dieta. As análises das soluções de otimizações em um sistema de produção de bovinos com engorda confinada mostraram que o período de confinamento e peso ideal de abate do animal são bastante influenciados pelo custo da dieta. Custos mais elevados da dieta requerendo pesos de abate inferiores e confinamentos mais curtos para um mesmo preço pago pelos animais. As dietas de mínimo custo do ganho não repercutiram, necessariamente, em valor presente máximo para o confinador em condições de estacionalidade de preços, indicando que tão importante quanto determinar baixo custo de produção é que as dietas devem proporcionar ganhos que permitam abate do animal em época e peso adequados para possibilitar máxima remuneração.

Um dos fatores mais importantes para otimização da lucratividade do confinamento em mercados com estacionalidade de preços foi a compra de

animais em época e pesos adequados para que o animal possa ser comercializado durante épocas onde a remuneração pelo produto seja mais vantajosa. Em sistemas com restrição na quantidade de volumoso, o valor presente por unidade de volumoso se apresentou como um índice melhor que o valor presente por animal como indicador de estratégias otimizantes.

A combinação de um algoritmo genético, otimização de dietas utilizando o método Simplex e simulação dinâmica de crescimento animal gerou soluções robustas para um problema abrangente de otimização de sistemas de engorda confinada, permitindo identificar estratégias ótimas para diferentes cenários de preços e sistemas de produção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL **Energy and protein requirement of ruminants:** an advisory manual prepared by the AFRC technical committee on responses to nutrients. Wallingford: CAB International, 1993. 159p.

AMER, P.R.; KEMP, R.A.; BUCHANANSMITH, J.G. FOX; G.C.; SMITH, C. A bioeconomic model for comparing beef cattle genotypes at their optimal economic slaughter end point. **Journal of Animal Science**, v.72, n.1, p.38-50, 1994.

ANDERSON, J.R.; DILLON, J.L.; HARDAKER, R. **Agricultural decision analysis**. Ames: Iowa University Press, 1977. 344p.

ANUALPEC **Anuário da pecuária brasileira**. São Paulo : Finep Consultoria & Comercio, 2002.

ATHANS, M. The discrete time linear-quadratic-gaussian stochastic control problem. **Annals of Economic and Social Measurement**, v.1, p.209-226, 1972.

- AVRIEL, M.; GOLANY, B. **Mathematical programming for industrial engineers**. New York: Marcel Dekker, 1996. 637p.
- BAKER, B.B.; BOURDON, R.M.; HANSON, J.D. **FORAGE: a model of forage intake in beef cattle**. *Ecological Modelling*, v.60, p.257-279, 1992.
- BALDWIN, R.L. **Modeling ruminant digestion and metabolism**. London: Chapman & Hall, 1995. 578p.
- BARCELLOS, A.O.; ANDRADE, R.P.; KARIA, C.T.; VILLELA, L. Potencial e uso de leguminosas forrageiras dos gêneros *Stylosanthes*, *Arachis* e *Leucaena*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 17., Piracicaba, 2000. **A planta forrageira no sistema de produção: anais**. Piracicaba: FEALQ, 2000. p.297-357.
- BARIONI, L.G.; TEDESCHI, L.O.; LANNA, D.P.D. Using a combined linear and non-linear optimization algorithm to maximize net return in feedlots. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, Hamilton, 1999. Proceedings. Hamilton: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 1999. p.807-812.
- BELTRAME FILHO, J.A.; TEDESCHI, L.O.; CAPELARI, D.A.; RIBEIRO, F.G.; JOSE, A.A.F.B.; LANNA, D.P.D. Comparação entre dietas de custo mínimo e lucro máximo para ruminantes em diferentes cenários de produção. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 5.; REUNIÃO PAULISTA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 8., CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA ESALQ, 11., AGROPECUÁRIA, São Paulo, 1997. **Resumos**. São Paulo: USP, 1997. p.530.

- BLACKIE, M.J.; DENT, J.B. **Information systems for agriculture**. London: Applied Science Publishers, 1979. 176p.
- BOIN, C. Formulação de rações para bovinos de corte em confinamento. In: PERES, F.C.; MARQUES, P.V. (Ed.) **Manual de cálculo de rações de custo mínimo com uso de microcomputadores**. Piracicaba: FEALQ, 1988. cap.6, p.141-166.
- BYWATER, A.C. Exploitation of the system approach in technical design of agricultural enterprises. In: JONES, J.G.W.; STREET, P.R. (Ed.). **Systems theory applied to agriculture and food chain**. London: Elsevier Applied Sciences, 1990. cap.3, p.61-88.
- CAMPBELL, R.G. Nutritional constraints to lean tissue accretion in farm animals. **Nutrition Research Reviews**, v.1, p.233-253, 1988.
- CARDOSO, G.C. Alguns fatores práticos da irrigação de pastagens. In: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO DE GADO DE CORTE, 2., Viçosa, 2001. **Anais**. Viçosa: UFV, DZO, 2001. p.243-259.
- CAZCARRA, R.; PETIT, M. The effect of sward height on grazing behavior and herbage intake of 3 sizes of Charolais Cattle grazing cocksfoot swards. **Animal Science**, v.61, p.310-318, 1972.
- COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANIZATION (CSIRO) **Feeding Standards for Australian Livestock Ruminants**. Melbourne, 1990. 266p.
- CONRAD, H.R. Symposium on factors influencing the voluntary intake of herbage by ruminants: Physiological and physical factors limiting feed intake. **Journal of Animal Science**, v.25, p.227, 1966.

- CORSI, M.; MARTHA, G.B.; BALSALOBRE, M.A.A.; PENATI, M.A.; PAGOTTO, D.S.; SANTOS, P.M.; BARIONI, L.G. Tendências e perspectivas da produção de bovinos sob pastejo. In: Simpósio sobre manejo da pastagem: a planta forrageira no sistema de produção, 17., Piracicaba, 2000. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 2000. p.3-70.
- DIMARCO, O.N.; BALDWIN, R.L. Implementation and evaluation of a steer growth model. **Agricultural Systems**, v.29, p.21-34, 1989.
- DOYLE, C.J. Application of systems theory to farm planning and control: modelling resource allocation. In: JONES, J.G.W.; STREET, P.R. (Eds.). **Systems theory applied to agriculture and food chain**. London: Elsevier Applied Sciences, 1990. cap.4, p.89-112.
- FERREIRA, N.F. Otimização econômica em confinamento de bovinos de corte. Piracicaba, 1993. 89p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- FICK, G.W.; WILKENS, P.W.; CHERNEY, J.H. Modelling forage quality changes in the growing crop. In: FAHEY, G.C.JR.; MOSER, L.E.; MERTENS, D.R.; COLINS, M. (Ed.) **Forage quality evaluation and utilization**. Madison: American Society of Agronomy, 1994. cap.18, p.757-795.
- FORBES, J. M. **Voluntary food intake in farm animals**. London: CAB International, 1994. 532p.
- FOX, D.G. ; SNIFFEN, C.J.; O’CONNOR, J.D. Adjusting nutrient requirements of beef cattle for animal and environmental variations. **Journal of Animal Science**, v.66, p.1475, 1988.

FOX, D.G.; TYLUTKI, T.P.; VAN AMBURGH, M.E.; CHASE, L.E.; PELL, A.N.; OVERTON, T.R.; TEDESCHI, L.O.; RASMUSEN, C.N.; DURBAL, V.M. **The net carbohydrate and protein system for evaluating herd nutrition and nutrient excretion.** Ithaca: Cornell University, Animal Science Department, 2000. 235p. (Mimeograph, 213)

FRANCISCO, V.L.F.S.; MARTIN, N.B. A Informática na Agricultura Paulista. . In: **AGROSOFT 99 - CONGRESSO E MOSTRA DE AGROINFORMÁTICA, 1999 Anais.** Agrosoft: Juiz de Fora, 1999. 30-33p.

FRONTLINE SYSTEMS INC **Solver user's guide: dynamic link library.** Incline Village: Frontline Systems, 1999. 144p.

GARCIA, C. Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos. São Paulo: EDUSP, 1997. 458p.

GILL, M.; OLDHAM, J.D. Growth In: FORBES, J.M.; FRANCE, J. **Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism.** Wallingford: CAB International, 1993. cap.17, p.383-404.

GOLDBERG, D.E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading: Addison-Wesley. 1989. 412p.

HERTZLER, G.; WILSON, D.E.; LOY, D.D.; ROUSE, G.H. Optimal beef cattle diets formulated by nonlinear programming. **Journal of Animal Science**, v.66, p.1115-1123. 1988.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE **Ruminant nutrition.** Paris: John Libbey Eurotext, 1989. 389p.

- KLUTHCOUSKI, J.; OLIVEIRA, I.P.; YOKOYAMA, L.P.; CASTRO, T.A.P.; SILVA, F.R. Integração agricultura x pecuária – experiências na recuperação de pastagens utilizando a cultura do arroz de sequeiro – sistema barreira. In: PAULINO, V.T.; FERREIRA, L.G. (Ed.) **Recuperação de pastagem**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1999. cap.7, p.79-86.
- LANNA, D.P.D., TEDESCHI, L.O.; BELTRAME FILHO, J.A. Comparação de modelos lineares e não-lineares de simulação do uso de nutrientes em ruminantes para formulação de dietas que maximizem o retorno econômico, **Scientia Agricola**, v.56, n.2, p.479-488, 1999.
- LANNA, D.P.D.; FOX, D.G.; BOIN, C.; TRAXLER, M.J.; BARRY, M. Validation of the Cornell Net Carbohydrate and Protein System estimates of nutrient requirements of growing and lactating Zebu germplasm in tropical conditions. **Journal of Animal Science**, v.74, suppl. 1, p.287, 1996.
- LANNA, D.P.D.; BARIONI, L.G.; TEDESCHI, L.O.; BOIN, C. **RLM - rações de lucro máximo: guia do usuário**. Piracicaba: FEALQ, 1999. 27p.
- LASDON, L.; WAREMN, A.; JAIN, A.; RATNER, M. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming; **ACM Transactions on Mathematical Software**, v.4, n.1, p 34-50, 1978.
- LAZZARINI, S.G.; MACHADO FILHO, C.A.P.; LAZZARINI NETO, S. Sistema agroindustrial da carne bovina no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 33., 1995. Curitiba. **Anais**. Brasília: SOBER, 1995. p.84-97.
- LOEWER, O.J.; SMITH, E.M.; TAUL, K.L.; TURNER, L.W.; GAY, N. A body composition model for predicting beef animal growth. **Agricultural Systems**, v.10, p.245-256, 1983.

MARTIN, N.B.; PIRES, Z.A. **Período ótimo de confinamento de bovinos de corte**. São Paulo: Secretaria da Agricultura, Instituto de Economia Agrícola, 1975. 25p.

MAYER D.G.; BELWARD, J.A.; BURRAGE, K. Use of Advanced Techniques to Optimize a Multi-dimensional Dairy Model. **Agricultural Systems**, v.50, n.3, p.239-253, 1996.

MERTENS, D. R. Regulation of forage intake. In: FAHEY, G. C. JR.; MOSER, L. E.; MERTENS, D. R. AND COLINS, M. (Ed.) **Forage quality evaluation and utilization**. Madison: American Society of Agronomy, 1994. cap.11, p.450-493.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Nutrient requirements of beef cattle**. 7.ed. Washington: National Academy Press, 1996. 242p.

OLTJEN, J.W.; BYWATER, A.C.; BALDWIN, R.L.; GARRETT, W.N. Development of a dynamic model of beef cattle growth and composition. **Journal of Animal Science**, v.62 p.86-97, 1986.

OLTJEN, J.W.; PLEASANTS, A.B.; SOBOLEVA, T.K.; ODDY, V.H. Second generation dynamic cattle growth and composition models. In: MCNAMARA, J.P.; FRANCE, J.; BEEVER, D.E. (Ed) **Modelling nutrient utilization in farm animals**. New York: CAB Publishing, 2000. cap. p.197-210.

PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering. **Agronomy Journal**, v.88, p.690-694, 1996.

- PEREIRA, J.M.; REZENDE, C.P. Sistema Silvipastoris: Fundamentos agroecológicos e estado da arte no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 13., Piracicaba, 1997. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 1997. p.199-219.
- RESENDE FILHO, M.A. Desenvolvimento de um sistema de apoio ao processo de tomada de decisão em confinamento de bovinos de corte. Viçosa, 1997. 116p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
- ROTHEMBERG, J. The nature of modelling. In: WIDMAN, L.E.; LOPARO, K.A.; NIELSEN, N.R. (Ed.) **Artificial intelligence, simulation and modelling**. New York: John-Wiley, 1989. cap.3, p.75-92.
- RYAN, W.J. Compensatory growth in cattle and sheep. **Nutrition Abstracts and Reviews**. Series B, v.60, p.653-664, 1990.
- SAINZ, R.D.; WOLFF, J.E. Development of a dynamic, mechanistic model of lamb metabolism and growth. **Animal Production**, v.51, p.535-549, 1990.
- SAINZ, R.D.; DE LA TORRE, F.; OLTJEN, J.W. Compensatory Growth and Carcass Quality in Growth-Restricted and Refed Beef Steers. **Journal of Animal Science**, v.73, n.10, p.2971-2979, 1995.
- SCOTT, J. T., Jr.; BROADBENT, E.E. A computerized cattle feeding program for replacement and ration formulation. **Illinois Agricultural Economics**, v.12, n.2, p.16-25, 1972.
- SILVEIRA, A.C.; ARRIGONI, M.B.; DE OLIVEIRA, H.N.; COSTA, C.; CHARDULO, L.A.L.; SILVEIRA, L.G.G.; MARTINS, C.L. Produção do novilho superprecoce. In: Simpósio de Produção de Gado de Corte, 2., Viçosa, 2001. **Anais**. Viçosa: UFV, DZO, 2001. p.37-53.

- SIMPSON, R.; CLARK, S.; ALCOCK, D.; FREER, M.; DONNELLY, J.R.; MOORE, A.D. How plant physiology can help us achieve better grazing management. In: ANNUAL CONFERENCE GRASSLAND SOCIETY NSW, 11., Wagga Wagga, 1996. **Proceedings**. Wagga Wagga: Grassland Society of New South Wales, 1996. p.57-64.
- SOBOLEVA, T.K.; ODDY, V.H.; PLEASANTS, A.B.; OLTJEN, J.W.; BALL, A.J.; MCCALL, D.G. A dynamical model of body composition in sheep. **Proceeding of the New Zealand Society of Animal Production**, v.59, p.275-278, 1999.
- STUTH, J.W.; SMITH, M.S. Decision support for grazing lands: an overview. In: STUTH, J. W.; LYONS, B. G. (Ed.) **Decision support systems for the management of grazing lands: emerging issues**. Paris: Unesco, 1993. cap.1, p.7-32.
- THORNLEY, J.H.M. **Grassland dynamics: an ecosystems simulation model**. New York: CAB International, 1996. 241p.
- THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. Plant and crop modelling: A mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford: Clarendon Press. 1990. 491p.
- TSURUTA, J.H.; NARCISO, M.G. **Um estudo sobre algoritmos genéticos**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2000. 17p.
- TURBAN, E. **Decision support systems: managerial perspectives**. New York: Macmillan Publishing Company, 1988. 697p.

- TURBAN, E. **Decision support and expert systems**. 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 846p.
- VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**. New York: Cornell University Press, 1994. 476p.
- VETHARANIAM, L.; MCCALL, D.G.; FENNESSY, P.F.; GARRICK, D.J. A model of mammalian energetics and growth: model development. **Agricultural Systems**, v.68, n.1, p.55-68, 2001.
- VILLA NOVA, N.A.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; PEREIRA, A.R. A model for prediction of elephant grass productivity as a function of air temperature, photoperiod and frequency of defoliation. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.75-79, 1999.
- WEISS, W.P.; CONRAD, H.R.; PIERRE, N.R.St. A theoretical-based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates. **Animal Feed Science and Technology**, v.39, p.95-110, 1992.
- WESTON, R.H. Some aspects of constraint to forage consumption by ruminants. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.47, p.175-197, 1996.
- WOODWARD, S.J.R. Dynamical systems models and their applications to optimizing grazing management. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.) **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998. p.419-474.
- ZIMMER, A.H.; CORREA, E.S. A pecuária nacional, uma pecuária de pasto? In: PAULINO, V.T.; FERREIRA, L.G. **Recuperação de pastagem**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1999. p.3-13.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - DEDUÇÃO DE KG PARA AS EQUAÇÕES DO NRC

O AFRC (1993) conceitua kg como o acréscimo na energia retida correspondente ao aumento da ingestão de energia metabolizável acima de manutenção, energia retida e ingestão de energia metabolizável expressas nas mesmas unidades, ou seja:

$$kg = \frac{ER2 - ER1}{MEI2 - MEI1}$$

Considerando que MEI1 é a ingestão de ME na manutenção e ER1 é a retenção de energia na manutenção (ER1 = 0), temos que:

$$kg = \frac{ER2}{MEI2 - MEI_{m}}$$

O NRC prediz ingestão de energia metabolizável em função de NEm. Assim a ingestão de energia metabolizável é:

$$MEI = \frac{NEmI}{NEm} * ME$$

Chamando o gasto energético de NEm para manutenção NEm_m, temos que a ingestão de energia metabolizável para manutenção é:

$$MEI = \frac{NEmIm}{NEm} * ME$$

e MEI2 - MEIm pode ser expresso como:

$$MEI_{am} = \frac{NEmI - NEmIm}{NEm} * ME$$

De forma semelhante, ER2 é o resíduo da energia líquida de manutenção consumida convertida para energia metabolizável:

$$ER2 = \frac{NEmI - NEmIm}{NEm} * NEg$$

Deduz-se que kg é a razão entre as estimativas de NEg e ME:

$$kg = \frac{ER2}{MEI_{am}} = \frac{\frac{NEmI - NEmIm}{NEm} * NEg}{\frac{NEmI - NEmIm}{NEm} * ME} = \frac{NEg}{ME}$$

A equação de Garret (1980), apresentadas no NRC (1996) prediz NEg em função de ME:

$$NEg = 1.42*ME - 0.174*ME^2 + 0.0122*ME^3 - 1.65,$$

Pode-se então deduzir que a eficiência energética de ganho proposta pelo NRC é:

$$\begin{aligned}
 k_g &= \frac{1.42 * ME - 0.174 * ME^2 + 0.0122 * ME^3 - 1.65}{ME} \\
 &= 1.42 - 0.174 * ME + 0.0122 * ME^2 - \frac{1.65}{ME}
 \end{aligned}$$

APÊNDICE 2 - DEMONSTRAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE UM NÍVEL DE EQUILÍBRIO DE PROTEÍNA E RELAÇÃO PROTEÍNA/DNA NO MODELO DE OLTJEN (1986)

Existe um nível de proteína no qual a diferença entre síntese e degradação de proteínas é nula. Denominamos esse nível de proteína de equilíbrio, abreviado $PROT_E$. Assim, no modelo de Oltjen $PROTE = PROT$ quando $PROTSYN = PROTDEG$.

Utilizando as funções de Oltjen para síntese e degradação de proteínas, deduzimos que:

$$PROTSYN = PROTDEG$$

$$K_2 DNA^{0.73} NUT_2 = K_3 PROTE^{0.73}$$

$$PROT_E = \left(\frac{k_2 NUT_2}{K_3} \right)^{1.37} DNA$$

Assim $PROT_E$ é função do aporte energético calculado por NUT_2 e da quantidade de DNA nos tecidos do animal. Como o tamanho das células pode ser estimado pela relação $PROT/DNA$, pode-se estimar que o tamanho celular converge para o nível de equilíbrio $PROT_E/DNA$, no qual cessa a deposição de proteína. Assim deduz-se que:

$$\frac{PROT_E}{DNA} = \left(\frac{k_2 NUT_2}{K_3} \right)^{1.37}$$

É possível demonstrar também que quanto maior a diferença entre a $PROT_E$ e a quantidade atual de proteínas, maior será a deposição de tecido desengordurado ($V_p = PROTSYN - PROTDEG$) e, portanto, maior o ganho para um determinado aporte energético.

$$\begin{aligned} GD &= PROTSYN - PROTDEG \\ &= K_2 DNA^{0.73} NUT_2 - K_3 PROTE^{0.73} \end{aligned}$$

$$\text{Como } DNA^{0.73} = \frac{K_3 PROTE^{0.73}}{K_2 NUT_2}, \text{ temos que:}$$

$$V_p = K_3 PROTE^{0.73} - k_3 PROT^{0.73}$$

$$V_p = K_3 (PROTE - PROT)^{0.73}$$