

Previsão das Dimensões Principais de um Sistema Alternativo de Geração de Energia Elétrica por Magnetohidrodinâmica(MHD)

José Nédilo Carrinho de Castro

Paulo Magalhães Filho

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia

Cx. P.205-12500-000 Guaratinguetá, SP, Brasil

Resumo. Neste trabalho é proposto um gerador de energia elétrica por magnetohidrodinâmica, de pequeno porte (20 MWt) com a queima de combustível celulignina gerada da hidrólise ácida da biomassa proveniente do bagaço da cana de açúcar. O programa brasileiro de álcool produz uma quantidade imensa de bagaço, o qual após sofrer hidrólise ácida, gera como subproduto a celulignina. Esta, após uma carbonização, constitui-se em um bom combustível, quase que a base de carbono puro. É proposta a combustão da celulignina com oxigênio puro e a adição de Argônio na proporção de 0,6 a 1,2 da massa de CO_2 , a fim de se aumentar o fluxo de massa do plasma no canal de MHD. É feita a ionização do plasma com semente de K_2CO_3 na proporção de 1% do gás. O objetivo deste trabalho é dimensionar o canal do gerador linear de MHD, bem como a determinação da potência elétrica gerada no canal, a densidade de corrente nos eletrodos, o comprimento do canal e demais parâmetros do canal a partir das propriedades da combustão da celulignina.

Palavras-chave: Fontes alternativas, Magnetohidrodinâmica.

1. INTRODUÇÃO

É proposto neste trabalho um gerador de energia por magnetohidrodinâmica, de pequeno porte (20 MWt) com a queima de celulignina gerada da biomassa de uma destilaria de álcool de cana de açúcar. O Programa Brasileiro de Álcool produz uma quantia imensa de bagaço, o qual, após sofrer uma hidrólise ácida, gera como subproduto a celulignina. Esta, após uma carbonização constitui-se em um bom combustível, quase que a base de carbono puro.

É proposta a combustão da celulignina com Oxigênio puro e a adição de Argônio na proporção de 0,6 a 1,2 da massa de CO_2 , a fim de se aumentar o fluxo de massa do plasma no canal de MHD. É feita a ionização do plasma com semente de K_2CO_3 na proporção de 1% do gás (Pinatti, 1991).

O objetivo deste trabalho é dimensionar o canal do gerador de MHD tipo diagonal, bem como a determinação da potência elétrica gerada no canal, a densidade de corrente nos eletrodos, o comprimento e demais parâmetros do canal.

2. RELAÇÕES FUNDAMENTAIS

Nesta análise assume-se um fluxo unidimensional no canal linear de MHD. As coordenadas são tomadas como se vê na "Fig. 1". As equações da MHD são dadas à seguir, conforme Takano & Onda (1973) e Mori (1971) propuseram, sendo:

ρ : massa específica	x, y, z : coordenadas
u : velocidade do gás	D : largura do canal
A : área da seção	θ : ângulo de ligação dos eletrodos
G : fluxo de massa	H : distância entre as paredes dos eletrodos
p : pressão estática	β : parâmetro de Hall
\vec{J} : vetor densidade de corrente	$\sigma_{(p,t)}$: condutividade do plasma
\vec{B} : vetor intensidade magnética	f : perda de carga
Q : perda de calor	$h_{(p,T)}$: entalpia do gás
\vec{E} : vetor de campo elétrico estático	$R_{(p,T)}$: constante do gás
T : temperatura de estagnação	

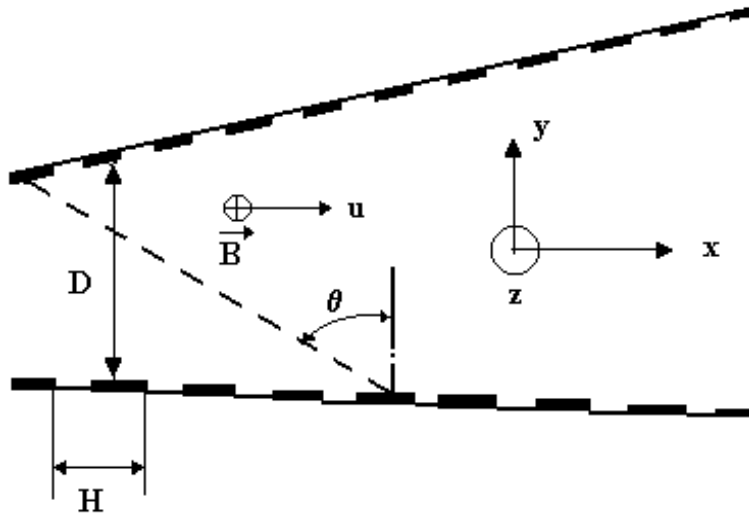


Figura 1 - Coordenadas e ângulo do canal do gerador de MHD tipo diagonal

$$G = \rho u A \quad (01)$$

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = (\vec{J} \times \vec{B})_x - f \quad (02)$$

$$\rho u \frac{dh}{dx} + \rho u^2 \frac{du}{dx} = \vec{E} \cdot \vec{J} - Q \quad (03)$$

$$p = \rho RT \quad (04)$$

Da lei de Ohm generalizada tem-se :

$$J_x = \frac{\sigma_{(p,t)}}{1 + \beta^2} \left\{ -E_x + \beta(E_y - uB) \right\} \quad (05)$$

$$J_y = \frac{\sigma_{(p,t)}}{1 + \beta^2} \left\{ \beta E_x + (E_y - uB) \right\} \quad (06)$$

2.1 Gerador MHD tipo faraday

O gerador tipo Faraday é aquele que possui os eletrodos segmentados para eliminar o efeito Hall. Nesse caso temos:

$$(\vec{J} \times \vec{B})_x = \sigma_{eff} (uB - V_d / H)(K - 1)B \quad (07)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \sigma_{eff} (uB - V_d / H)^2 (K - 1)K \quad (08)$$

σ_{eff} : é a condutividade efetiva devido à segmentação finita do eletrodo

V_d : queda de tensão no eletrodo

K : fator de carga

A condutividade efetiva é dada por:

$$\sigma_{eff} = \frac{\lambda}{\langle G \rangle} \gamma \sigma_{(p,t)} = 0,8 \sigma \quad (09)$$

$\langle \rangle$: média

λ : coeficiente de correção para eletrodos com segmentação infinita;

$\langle G \rangle$: fator de Rosa, (Rosa, 1968)

γ : fator de correção para outros efeitos (não homogeneidade)

$$\langle G \rangle = \left\langle \sigma_{(p,t)} \left\langle \frac{1 + \beta^2}{\sigma_{(p,t)}} \right\rangle - \langle \beta^2 \rangle \right. \quad (10)$$

2.2 Gerador MHD tipo diagonal

Este gerador é do tipo em que a ligação dos eletrodos é feita diagonalmente, como mostra a "Fig. 1". Neste caso conforme Dzung (1976) propôs:

$$(\vec{J} \times \vec{B})_x = - \frac{A\sigma(uB - V_d / H) + I(\alpha + \varepsilon t - \beta)}{A[(\alpha - \varepsilon s)(\alpha + \varepsilon t) + \varepsilon\beta(s + t) + \langle G \rangle]} \times \vec{B} \quad (11)$$

$$\vec{E} \cdot \vec{J} = \frac{I(\langle G \rangle + \beta^2) - A\sigma(uB - V_d / H)(\alpha + \beta - \varepsilon s)}{A[(\alpha - \varepsilon s)(\alpha + \varepsilon t) + \varepsilon\beta(s + t) + \langle G \rangle]} \times \frac{I}{A} \quad (12)$$

I : corrente de carga

ε : razão entre o passo de segmentação do eletrodo e a distância entre as paredes dos eletrodos

α : cotangente do ângulo θ de conexão diagonal

s : funções do parâmetro de Hall

t : razão entre a largura do isolante entre os eletrodos e o passo de segmentação

2.3 Equações para a perda de carga e de calor nas paredes do canal (Way, 1983)

$$f = \frac{2}{D_H} C_f \rho u^2 \quad (13)$$

$$Q = \frac{4}{D_H} (q_{conv} + q_{rad}) \quad (14)$$

C_f : coeficiente de atrito

q_{conv} : fluxo de calor devido à convecção forçada

q_{rad} : fluxo de calor devido à radiação

D_H : diâmetro hidráulico

$$\text{para parede lisa} \rightarrow C_f = 0,0592 R_x^{-0,2} \quad (15)$$

$$\text{para parede rugosa} \rightarrow C_f = \left(2,87 + 1,58 \log \frac{x}{K_e} \right)^{-2,5} \quad (16)$$

R_x : número de Reynolds calculado para o comprimento

K_e : diâmetro equivalente para parede rugosa

$$q_{conv} = \frac{C_f}{2} \text{Pr}^{-2/9} \xi \rho u \left(h + \frac{u^2}{2} - h_{par} \right) \quad (17)$$

ξ : fator experimental de correção

h_{par} : entalpia à temperatura da parede

Pr : número de Prandtl

$$q_{rad} = S \frac{(T^4 - T_{par}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{par}} + \frac{1}{\epsilon_{gas}} - 1} \quad (18)$$

S : constante de Stefan - Boltzmann

T : temperatura do gás

T_{par} : temperatura da superfície da parede

ϵ_{gas} : emissividade do gás de combustão incluindo radiação das chamas

ϵ_{par} : emissividade da superfície da parede

2.4 Queda de tensão no eletrodo

A queda de tensão nos eletrodos conforme Petty (1986), é dada por:

$$\Delta V = (J / J^*) (1 + \beta^2)^{1/2} \quad (19)$$

J : densidade de corrente

$$J^* : (q\sigma/\delta)^{1/2}$$

q : fluxo de calor para a parede

σ : condutividade do fluxo central

δ : espessura da camada limite

3. SOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações básicas são resolvidas pelo método Runge - Kutta - Gill, com as seguintes condições de contorno:

(1) - Condições de entrada do fluxo para u, ρ , p, T e A serão encontradas na solução das seguintes equações com as condições de estagnação de entrada para pressão p_{10} e número de Mach M_1 e temperatura ambiente de 298 K.

$$U_1 = M_1 a(p_1, T_1) \quad (20)$$

$$A_1 = \frac{G}{\rho_1 u_1} \quad (21)$$

$$h(p_{10}, T_{10}) = \Delta h_{ent} + h_{298} \quad (22)$$

$$h(p_1, T_1) + \frac{u_1^2}{2} = h(p_{10}, T_{10}) \quad (23)$$

$$s(p_1, T_1) = s(p_{10}, T_{10}) \quad (24)$$

a(p,T) : é a velocidade de propagação do som no meio

$$a(p, T) = \left[\frac{\left(\frac{1}{T} - \frac{R_T(p, T)}{R(p, T)} \right) (\rho h_p(p, T) - 1)}{h_T(p, T)} + \rho \left(\frac{1}{p} - \frac{R_p}{R} \right) \right]^{-1/2} \quad (25)$$

O cálculo da entalpia de estagnação na entrada do canal, Δh_{ent} é dado por:

$$\Delta h_{ent} = \eta_{comb} (1 - \eta_{perdas}) \frac{\dot{q}}{G} \quad (26)$$

A taxa de produção de calor (\dot{q}) é dada por condição de entrada do reagente no combustível, com a condição dos produtos a 298,15K usando as propriedades do gás conforme (Magalhães, 1991).

η_{comb} : eficiência da combustão;

η_{perdas} : razão da perda de calor e a entrada de calor do combustível.

(2) - Condição de pressão na saída do canal:

$$p_2 = p_5 + \eta_{\text{dif}} (p_{20} - p_2) \quad (27)$$

p_2 : pressão estática na saída do canal

p_5 : pressão estática do difusor (extremidade além do canal)

p_{20} : pressão de estagnação na saída do canal

η_{dif} : eficiência do difusor

p_{20} : é obtida da solução das equações seguintes:

$$h(p_2, T_2) + \frac{u_2^2}{2} = h(p_{20}, T_{20}) \quad (28)$$

$$s(p_2, T_2) = s(p_{20}, T_{20}) \quad (29)$$

A equação que descreve a distribuição de velocidade ou a distribuição da área da seção transversal do canal é:

$$a \frac{du}{u} + b \frac{d\rho}{\rho} + c \frac{dp}{p} = F(x) dx \quad (30)$$

para velocidade constante $\rightarrow a = 1, b = 0, c = 0, F(x) = 0$

para numero de Mach constante $\rightarrow a = 2, b = -1, c = 1, F(x) = 0$

para seção transversal constante $\rightarrow a = 1, b = 1, c = 0, F(x) = 0$

em geral $\rightarrow a = 1, b = 1, c = 0, F(x) = -\frac{(dA/dx)}{A}$

Para a determinação de u, p, ρ, T e A desconhecidos, tem-se o conjunto de equações modificadas:

$$\frac{1}{u} \frac{du}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = 0 \quad (31)$$

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = (\vec{J} \times \vec{B})_x - f \quad (32)$$

$$\rho u^2 \frac{du}{dx} + \rho u h_p \frac{dp}{dx} + \rho u h_T \frac{dT}{dx} = \vec{E} \cdot \vec{J} - Q \quad (33)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} - \left(\frac{1}{p} - \frac{R_p}{R} \right) \frac{dp}{dx} + \left(\frac{1}{T} + \frac{R_T}{R} \right) \frac{dT}{dx} = 0 \quad (34)$$

$$a \frac{du}{u} + b \frac{d\rho}{\rho} + c \frac{dp}{p} = F(x) dx \quad (35)$$

4. RESULTADOS

A solução numérica das equações governantes propostas para o caso do gerador tipo diagonal, foram resolvidas para as condições estabelecidas de velocidade, número de Mach e seção transversal, baseadas em critérios gerais de projeto a serem respeitados, tais como: limite do valor do parâmetro de Hall, limite do arco e erosão dos eletrodos, limite da temperatura da parede, visto que há limite de condições de resfriamento, e interações dos parâmetros térmicos e magnéticos. A convergência dos valores calculados foi verificada pela comparação da pressão de saída pré-determinada.

Foram simulados casos, mantendo fixo o número de Mach na entrada 0,80, o fluxo mássico 2,0 [kg/s], a distância entre as paredes dos eletrodos 0,020 [m], a densidade de fluxo magnético máximo 4,0 [T], a temperatura máxima da parede do canal 1800 [K], a emissividade da parede do canal 0,80 e a entalpia de entrada 9500 [kJ/kg].

Com a pressão de estagnação na entrada do canal variando entre 7 e 10 [atm], e a corrente de carga variando entre 100 e 300 [A] foi obtida a "Fig. 2". Constatou-se que menores pressões de estagnação na entrada favorecem a geração de maiores potências úteis, tendo características próprias para cada corrente de carga. A simulação mostrou que a máxima geração ocorre para 7 [atm] e 300 [A], representando aproximadamente 7 % de rendimento.

A "Fig. 3" indica que há um aumento da condutividade elétrica com a diminuição da pressão, e que existem faixas distintas do comportamento da condutividade em função daquela. Não obstante, verifica-se também que existem valores ideais para a velocidade do gás, onde a condutividade elétrica atinge o ponto de máximo, para cada par de valor de pressão e corrente.

A "Fig. 4" mostra que a perda térmica é função tanto da pressão quanto da corrente. No entanto, menores pressões reduzem a perda térmica, a qual se mantém em torno de valores fixos, independente da corrente de carga.

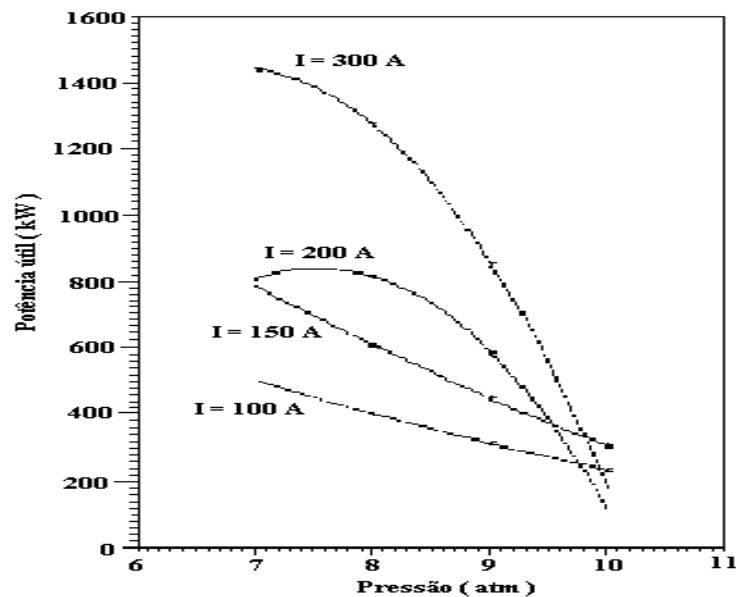


Figura 2 - Potência útil versus pressão de estagnação na entrada do canal

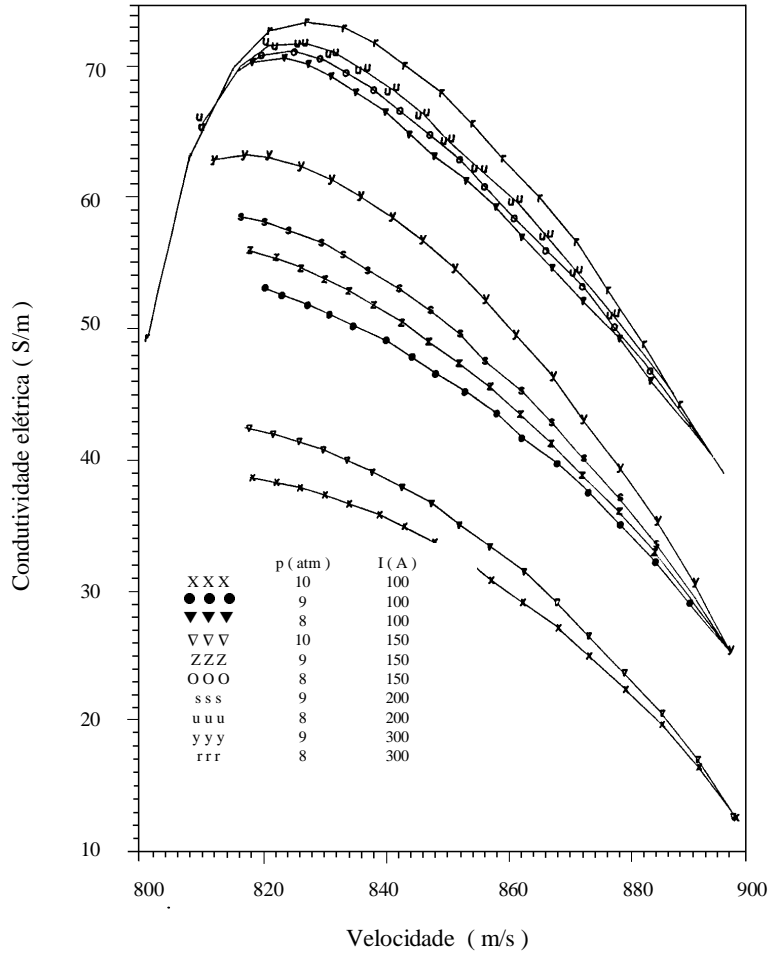


Figura 3 - Condutividade elétrica versus velocidade do gás no canal

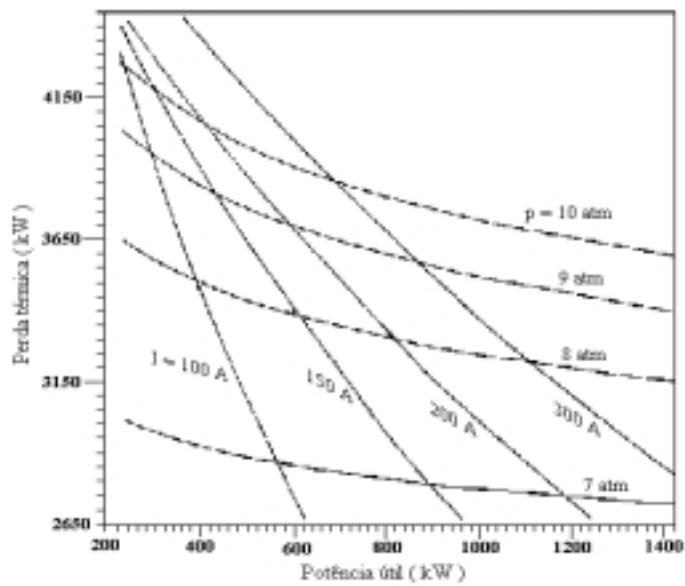


Figura 4 - Perda térmica versus potência útil

Finalmente, quanto ao comprimento do canal gerador para o caso simulado, a "Fig. 5" indica que menores pressões favorecem o aumento da condutividade elétrica do gás. Para valores mais elevados de corrente de carga (200 a 300 [A]), tem-se um acentuado declínio da condutividade próximo às seções de saída do canal, que para o caso foi fixado em um comprimento máximo de 3,40 [m].

Considerando que os produtos da combustão deixam o canal numa temperatura próximo a 1200 [K], um estudo de cogeração utilizando esse fluxo térmico é perfeitamente possível e recomendado.

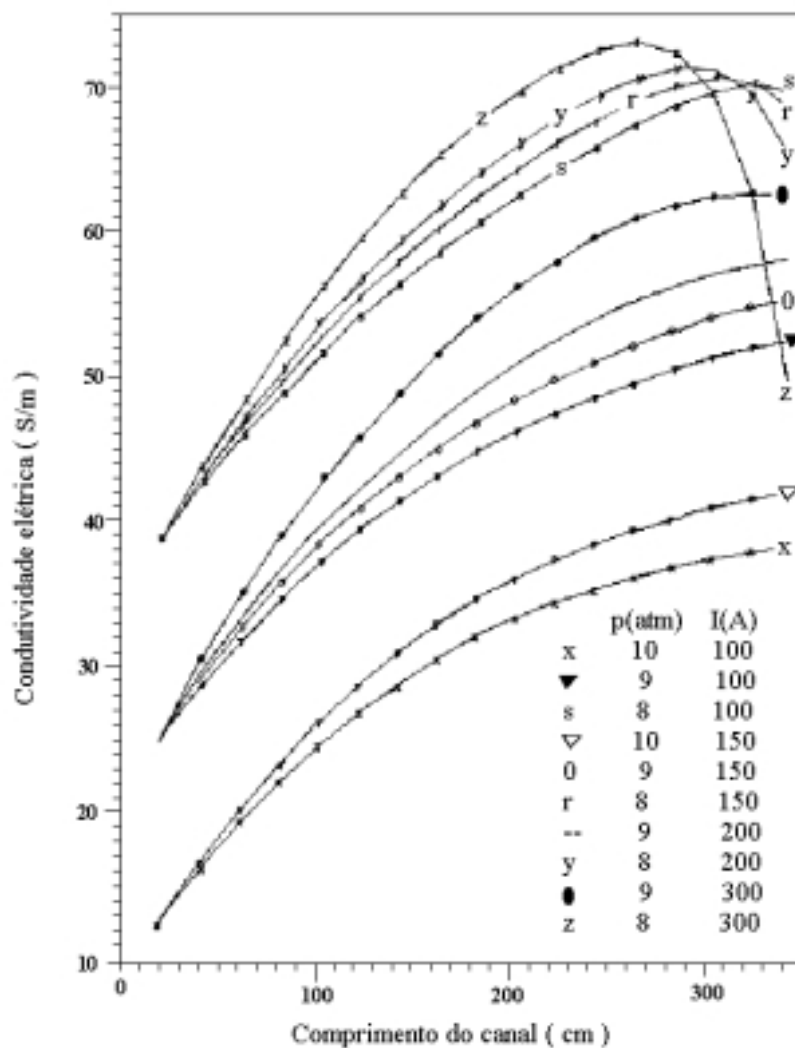


Figura 5 - Condutividade elétrica versus comprimento do canal

REFERÊNCIAS

- Dzung, L. S., 1976 Brown Boveri Review, 53-3, 238.
- Magalhães Filho, P., et alli, 1991, Determinação teórica de propriedades físicas dos produtos da combustão da lignina ionizada, Anais do XI Congresso de Engenharia Mecânica, Dezembro 11-13, São Paulo, pp.85-88.
- Mori, Y., 1971, 5th International Conference on MHD Power Generation, Vol.1, p. 569.
- Petty, S. W., 1986, Proceedings of 9th International Conference on MHD, Nov. 17-21, Tsukuba, p. 676.
- Pinatti, D.G., et alli, 1991, Planta piloto de geração de energia por magnetohidrodinâmica: tecnologia e cronograma de implantação, Anais do I Congresso Brasileiro de Física dos Plasmas, Dezembro 10-13, Santos, pp. 242-257.
- Rosa, R. J., 1968, Magnetohydrodynamics Energy Conversation; McGraw-Hill Book Company, N.Y.
- Takano, K. & Onda K., 1973, Calculation of performance of large scale diagonal MHD - steam plants, Proceedings of 13th Symposium on Engineering Aspects of MHD.
- Way, S., 1983, Application of radiant recuperations in MHD power plants, Proceedings of 8th Int. Conf. On MHD Electrical Power Generation, Moscow, vol. 3, I.10.

Pre-Design of an Alternative Electrical Energy Magnetohydrodynamics (MHD) Generator System

Abstract. *A small-sized generator of electric energy by magnetohydrodynamics (20 MWt) powered by cellulignin fuel generated by acid hydrolysis of the biomass generated by sugar cane waste is proposed in this paper. The brazilian program of alcohol produces a huge amount of waste, and after this waste goes through acid hydrolysis it gives off cellulignin. This product - after going through carbonization - turns into good fuel, basically nearly pure carbon. It is proposed here the combustion of cellulignin and pure oxygen plus the addition of argon at the proportion of 0,6 to 1,2 from the mass of CO₂, in order to increase the plasma flow at the MHD channel. The ionization of plasma is made with K₂CO₃ seed at the proportion of 1% of gas. The objective of this paper is to assess the MHD linear generator channel, as well as to determine the electric power generated at the channel, electrodes current density, channel length and other channel parameters from the cellulignin combustion properties on.*

Keywords: *Energy alternative sources, Magnetohydrodynamics.*