

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANDRÉ LUIZ CANZI**

**INFLUÊNCIA DO CONTROLE DE FREQUÊNCIA TIPO CARGA “DUMP” NA  
REGULAÇÃO DE TENSÃO DE MICROCENTRAIS ELÉTRICAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2011**

ANDRÉ LUIZ CANZI

**INFLUÊNCIA DO CONTROLE DE FREQUÊNCIA TIPO CARGA  
“DUMP” NA REGULAÇÃO DE TENSÃO DE MICROCENTRAIS  
ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. M.Sc. César Augusto Portolann

PATO BRANCO

2011

## TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de diplomação intitulado **INFLUÊNCIA DO CONTROLE DE FREQUÊNCIA TIPO CARGA “DUMP” NA REGULAÇÃO DE TENSÃO DE MICROCENTRAIS ELÉTRICAS** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **XXX** de 20XX.

Fizeram parte da banca os professores:

**César Augusto Portolann**

**Ricardo Vasques de Oliveira**

**Rafael Cardoso**

**José Fábio kolzer**

## RESUMO

CANZI, André L. Influência do Controle de Frequência tipo Carga “Dump” na Regulação de Tensão de Micro Centrais Elétricas. 2011. 37 f. Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011.

Em micro centrais elétricas isoladas, às vezes, o regulador de velocidade pode ser substituído por uma carga auxiliar, chamada comumente de carga “dump”. Nestes casos, a regulação de tensão pode ser influenciada por esse tipo de controle, visto que a característica de carga passa a depender também dessa carga auxiliar. Neste trabalho é avaliada, a influência do referido controle de frequência, na regulação de tensão de micro centrais elétricas isoladas. Em geral a carga “dump” faz com que o conjunto turbina-gerador perceba de instante em instante uma carga aproximadamente fixa, e a expectativa é que o controle de frequência contribua favoravelmente com a regulação de tensão. Entretanto, outros aspectos devem ser considerados, como por exemplo, o fator de potência da carga, do qual a regulação de tensão também é dependente.

**Palavras-chave:** Carga “dump”, Controle de frequência, Eficiência energética, Micro central elétrica, Regulação de tensão, Sistema isolado.

## ABSTRACT

Canzi, André L. Influence of type Load Frequency Control Dump Voltage Regulation on Micro Power Plants. 2011. 37 p. Work Proposal End of Course - Course of Electrical Engineering, Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, 2011.

In isolated micro power plants, sometimes the speed regulator can be replaced by an auxiliary load, commonly called the charge dump. In these, the voltage regulation can be influenced by this type of control, since the characteristic load is also dependent on the help of this burden. This work evaluated the influence of that frequency control, voltage regulation on micro power plants alone. In general the load dump means that the turbine-generator notice from moment to moment about a fixed load, and it is expected that the frequency control will contribute favorably to the voltage regulation. However, other aspects should be considered, such as the power factor of load, which voltage regulation is also dependent.

**Keywords:** Dump load, frequency control, energy efficient, micro power station, voltage regulation, system isolation.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Sistema de regulação de tensão .....	9
Figura 2 - Micro central elétrica com gerador síncrono .....	10
Figura 3 - Micro central elétrica assíncrona com regulação de tensão através de banco de capacitores .....	11
Figura 4- Regulação de tensão com AVR + RV .....	11
Figura 5 - Micro central elétrica com gerador CC.....	14
Figura 6 – Variação da carga “dump” (representada pela largura de pulso $w$ ) com a variação de f. e. m. do gerador.....	15
Figura 7 - Tensão para fonte constante e carga variante .....	16
Figura 8 - Características natural e modificada de tensão do gerador CC.....	16
Figura 9 – Diagrama de tensões equivalentes para decremento de potência em $Z_1$	18
Figura 10 – Diagrama de tensões equivalentes .....	18
Figura 11 – Diagrama de tensões equivalentes para fator de potência unitário.....	19
Figura 12 – Diagrama de tensões equivalentes para aumento de potência em $Z_1$ ...	19
Figura 13 – Diagrama de tensões equivalentes para decremento de potência em $Z_1$ .....	20
Figura 14 – Diagrama de tensões .....	20
Figura 15 – Algoritmo 1 para cálculo da tensão $V$ .....	23
Figura 16 –Tensão $V$ para diferentes fatores de potência.....	24
Figura 17– Algoritmo 2 para cálculo da tensão $V$ .....	24
Figura 18- Tensão $V$ para diferentes frequências .....	25
Figura 19- Regulação da Tensão $V$ em 60Hz/220V/380W.....	26
Figura 20 - Micro central elétrica com gerador síncrono e controle de frequência ....	27

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1- Resultados do ensaio preliminar .....	17
Tabela 2 – Determinação das equações de custos (estimativas) .....	30

## Lista de Siglas

PWM – Modulação por largura de pulso (*Pulse width modulation*)

Gerador cc – Gerador de corrente contínua

Gerador ca – Gerador de corrente alternada

Carga “dump” – Carga auxiliar ou carga secundária

RV – Regulador de velocidade

f.e.m. – Força eletromotriz

SCR - Retificador controlado de silício (*Silicium Controlled Rectifier*)

TRIAC – Tríodo para corrente alternada (*Triode for Alternating Current*)

AVR – Regulador Automático de tensão (*Automatic Voltage Regulator*)

LFC – Controlador de Frequência da Carga (*Load Frequency Control*)

PI – Controlador Integral

**V** – Tensão dos terminais do gerador

IC - Custo incremental



## SUMÁRIO

1. Introdução.....	7
2. Desenvolvimento .....	9
2.1 Estudos de referências .....	9
2.2 Caracterização do problema e solução proposta.....	12
2.3 Metodologia .....	13
2.4 Gerador cc .....	14
2.4.1 Resultados para gerador cc .....	15
2.5 Gerador síncrono.....	18
2.5.1 Análise das tensões para variações de potência .....	18
2.5.2 Resultados do gerador síncrono .....	22
2.5.3 Sistema proposto para o desenvolvimento do estudo.....	26
2.6 Considerações sobre a viabilidade econômica.....	28
2.6.1 Formação das equações de custo .....	28
3. Conclusão.....	33
4. Referências.....	34

## 1. INTRODUÇÃO

Em sistemas de geração de energia elétrica, particularmente nos de pequeno porte (até 100 KW), denominados de micro centrais elétricas, a eficiência energética é de suma importância, representada por vários indicadores, tais como energia gerada de boa qualidade (qualidade essa relacionada com o fornecimento de energia de forma contínua dentro de uma faixa aceitável de interferências, como variação mínima de frequência e variação mínima de tensão), custo inicial baixo, bom rendimento na conversão de energia e boa confiabilidade. Em micro centrais que operam de forma isolada, procura-se utilizar uma carga auxiliar, comumente chamada de carga “dump”, para efetuar o controle de frequência (Henderson), em substituição ao regulador de velocidade (RV). Isso gera uma expectativa de redução de custos gerais da planta.

Este trabalho visa analisar o efeito do referido controle de frequência, na regulação de tensão. A característica de carga (tensão x potência) dos geradores em geral, cai com o incremento da carga (Subramanian, 2010). Isto sugere que se o gerador estiver sempre carregado com plena carga, a regulação de tensão, do ponto de vista da carga principal, será minimizada. Como a carga “dump” tem o papel de fazer o conjunto turbina-gerador “ver” uma carga aproximadamente constante ou fixa, é de se esperar que a regulação de tensão seja melhorada com isso, passando a depender somente do fator de potência da carga principal. Se confirmada essa hipótese, o uso do regulador de tensão poderá ser desnecessário ou simplificado. Isto pode baratear ainda mais a planta de geração em função do custo considerável do regulador de tensão.

Nestes termos, o trabalho proposto consiste na avaliação do impacto do controle de frequência, em particular a carga “dump”, na regulação de tensão. Esse estudo basicamente se constitui em determinar “se”, “como” e “quanto” a regulação de tensão é influenciada pelo mencionado controle. Isto será operacionalizado por meio de expressões matemáticas, simulações e outros meios.

A partir da introdução, o trabalho está organizado de forma que na seção 2 é apresentado o desenvolvimento da proposta. A subseção 2.1 trata do estudo de referências. Na subseção 2.2 é apresentado o problema, que é o motivo principal desta proposta de TCC. Na sequência é feita a proposta de análise do impacto do controle da frequência na regulação de tensão. Na subseção 2.3 é discutida a metodologia da proposta, descrevendo as linhas gerais do projeto, quais recursos serão utilizados e métodos a serem empregados, a fim de se atingir os objetivos. Na subseção 2.4 são discutidos alguns resultados, obtidos de uma experiência com gerador cc, que caracterizaram um ponto de partida do estudo proposto. Na subseção 2.5 é apresentado o estudo do gerador síncrono, abordando os diagramas de tensões equivalentes, dedução de equações e apresentação de resultados de simulações. A subseção 2.6 trata da viabilidade econômica, apresentando fatores que apontam uma estimativa para os custos de utilização/implantação do sistema que utiliza regulador de velocidade e carga “dump”. Finalmente, na seção 3 são apresentadas as conclusões do estudo realizado.

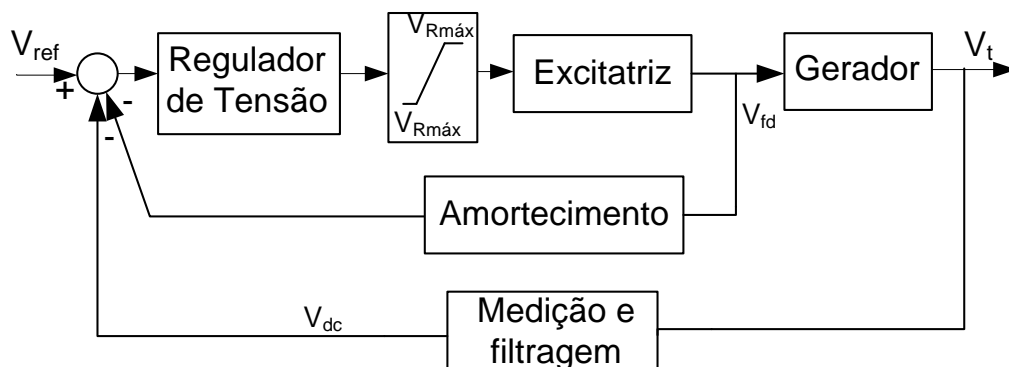
## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1 ESTUDOS DE REFERÊNCIAS

Como é bem conhecido, o controle é uma ferramenta utilizada em diversas aplicações do setor elétrico, como uma forma de manter o domínio sobre determinados equipamentos e dispositivos e, através disso otimizar as suas operações. Em se tratando do controle de tensão de micro sistemas elétricos isolados, podem-se citar várias referências bibliográficas, cujos autores procuram estabelecer circuitos eletro-eletrônicos para essa tarefa, procurando aliar eficiência e economia.

Bannura e Mardones apresentam uma análise comparativa das estratégias de controle de tensão e frequência que atuam somente em variáveis elétricas. O esquema regula a tensão de saída de um gerador síncrono usando uma malha PI simples, que atua no enrolamento de campo da máquina. Por sua vez, a frequência é controlada de modo independente da velocidade através de um inversor trifásico de saída.

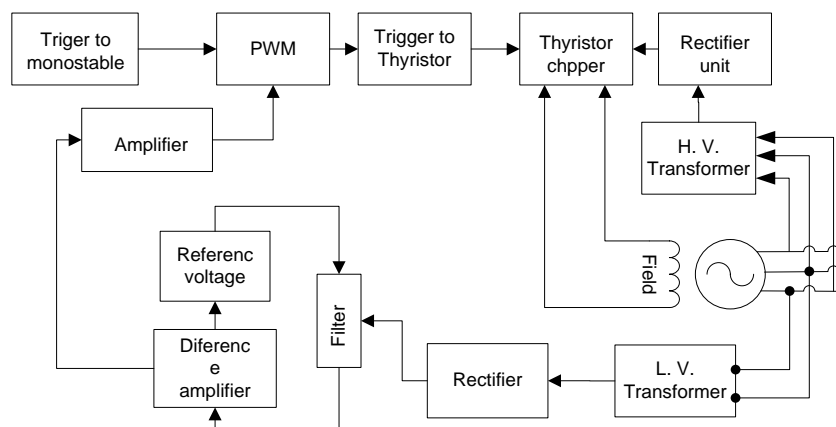
Kosow (1919), apresenta o controle de tensão de geradores síncronos, através de vários tipos de sistemas de excitação. A Figura 1 apresenta um sistema de regulação de tensão clássico. Neste caso, com base em uma tensão de referência, a tensão nos terminais do gerador é ajustada a partir da corrente de campo.



**Figura 1 – Sistema de regulação de tensão**  
**Fonte – Kosow**

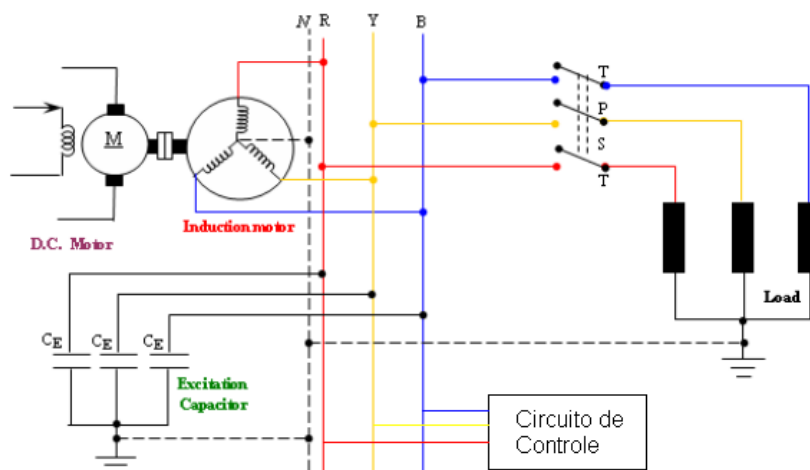
Watanabe, Maier e Barros, apresentam a concepção básica de um esquema de controle de tensão de um gerador síncrono, em um aproveitamento de energia eólica. O objetivo principal é extrair a máxima potência do vento e isso é efetuado adaptando a carga de baterias á potência da fonte primária, por meio da tensão gerada, que por sua vez é resultante da corrente de campo controlada.

Datta (1973) apresenta um sistema de regulação de tensão através do controle da intensidade de corrente de campo de um gerador síncrono, utilizando um circuito eletrônico tipo “pulsador” (modulação por largura de pulso). Isso é representado na Figura 2. Com base em uma tensão de referência, o ângulo de disparo do tiristor é ajustado para que a corrente média no campo produza a tensão terminal nominal.



**Figura 2 - Micro central elétrica com gerador síncrono**  
**Fonte - Datta (1973)**

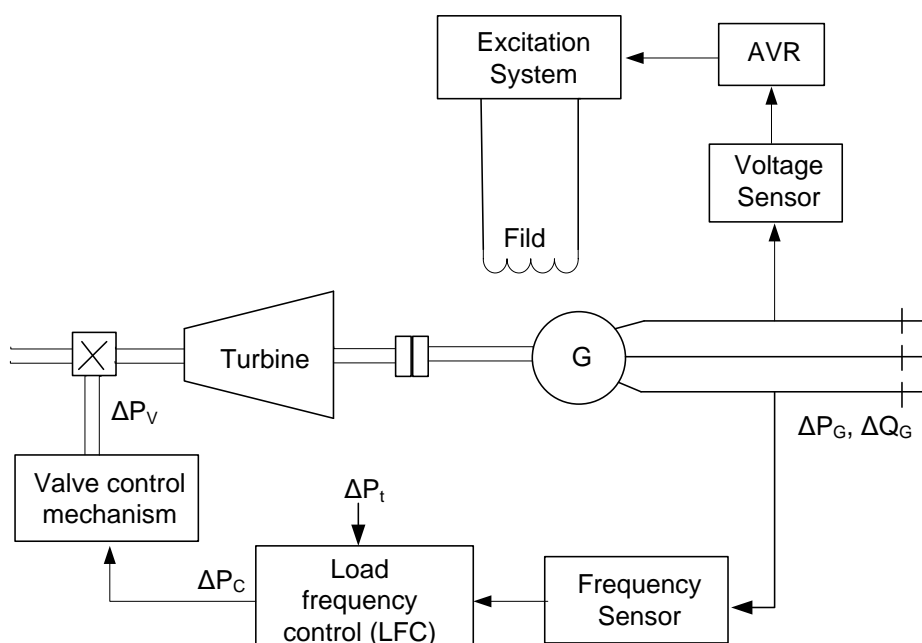
Subramanian (2010) discute um método de controle de tensão, e consequentemente restringe a sua regulação, através de um banco de capacitores que são inseridos/desligados nos terminais de um gerador de indução de uma micro central, conforme a tensão cai/aumenta respectivamente, com relação a um valor pré-definido. Na Figura 3, é representa essa topologia, onde o banco de capacitores é conectado nas fases R, Y e B, em paralelo com a carga. Com base em um sinal de tensão de referência o circuito de controle faz o ajuste da tensão terminal ativando/desativando os capacitores.



**Figura 3 - Micro central elétrica assíncrona com regulação de tensão através de banco de capacitores**

Fonte - Subramanian (2010)

Esperón (2004) apresenta um método tradicional para regular a tensão, o qual consiste em um AVR e um RV, ambos representados através de uma malha de tensão e controle de velocidade respectivamente. A figura 4 apresenta o diagrama esquemático para essa situação, nesta figura verifica-se que a corrente de campo é variável e ajustável através de um sinal do AVR “entregue” ao sistema de excitação (Excitation System). Além disso, também é possível notar a existência de uma válvula com controle do fluxo de água da turbina, sendo a válvula ajustada a partir de um sinal do LFC.



**Figura 4- Regulação de tensão com AVR + RV**

Fonte - Esperón (2004)

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

Na geração de energia elétrica, a regulação de tensão é fundamental para ajudar caracterizar uma boa qualidade do fornecimento entregue aos consumidores. A partir disso, novos estudos que apresentem técnicas mais eficientes, comportamento e características de máquinas elétricas submetidas a diferentes situações, sempre são bem vindos, considerando que cada vez mais se procura aliar boa eficiência com baixo custo. Também, possivelmente podem ajudar na escolha de um determinado meio de geração.

Cada tipo de gerador requer um esquema de natureza diferente para o controle de tensão, e são apresentadas muitas variantes para esses controles, que se diferenciam umas das outras em função de fatores, tais como custos de construção e implementação, dimensão do sistema, número de máquinas geradoras e potência demandada. Estabelecendo isso como uma situação geral, o problema a ser discutido nesta proposta de trabalho pode ser resumido da seguinte forma. Considerando bloqueado (inoperante) ou inexistente o controlador de tensão (AVR) de um micro sistema elétrico isolado, o desafio consiste em investigar se o controle de frequência do tipo carga “dump” influencia na regulação de tensão. Caso influencie positivamente, pode-se cogitar de eliminar, ou deixar de prever o controlador de tensão convencional, reduzindo ainda mais o custo total de uma micro central hidrelétrica.

## 2.3 METODOLOGIA

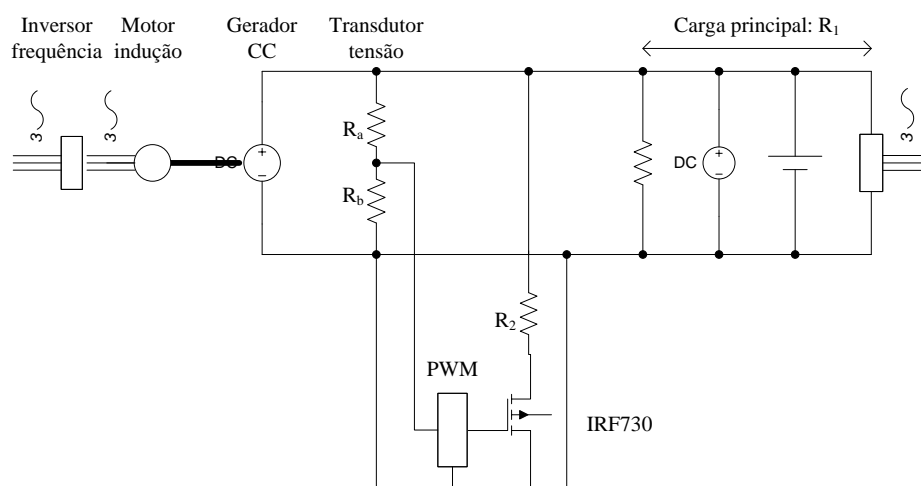
Para verificar a influência do referido controle de frequência, na regulação de tensão, de um modo geral foi adotada a seguinte metodologia:

- Obtenção de curvas características de tensão terminal, de um gerador cc, admitindo como carga “dump”, um transistor mosfet chaveando uma carga resistiva (pulsador ou *chopper* tipo “buck”);
- Montagem em laboratório de uma micro central elétrica, onde um inversor+motor de indução fizeram o papel de turbina para o gerador cc, e a carga “dump” consistia de um pulsador tipo “buck”. Desta montagem se obtiveram os resultados práticos para serem confrontados com os resultados esperados;
- Discussão dos resultados para a micro central com gerador cc;
- Estabelecimento de expressão matemática que relacione a tensão terminal de um gerador síncrono, com várias grandezas, mas principalmente com a frequência;
- Obtenção de curvas características de tensão terminal para diferentes fatores de potência da carga, para diferentes valores de frequência e finalmente para diferentes carregamentos, com fator de potência unitário;
- Discussão dos resultados para micro central elétrica com gerador síncrono;



## 2.4 GERADOR CC

O estudo realizado para o gerador cc consistiu em utilizar um sistema equivalente ao representado na Figura 5, o qual é composto de uma micro central elétrica, onde a regulação de tensão é dada a partir de uma carga secundária (“dump”) e um circuito de controle. A conexão do “inversor+motor” desempenha a função da turbina. Nessa figura ainda é apresentado um conjunto de cargas principal, denominadas de “ $R_1$ ” as quais em caso real equivalem à demanda de energia dos consumidores (máquinas, baterias, cargas) que o gerador está suprindo. Uma carga secundária denominada  $R_2$ , representa a carga “dump” e está conectada a um “mosfet” IRF730. As resistências  $R_a$  e  $R_b$  correspondem às resistências do transdutor de tensão utilizado para determinação do sinal de PWM.

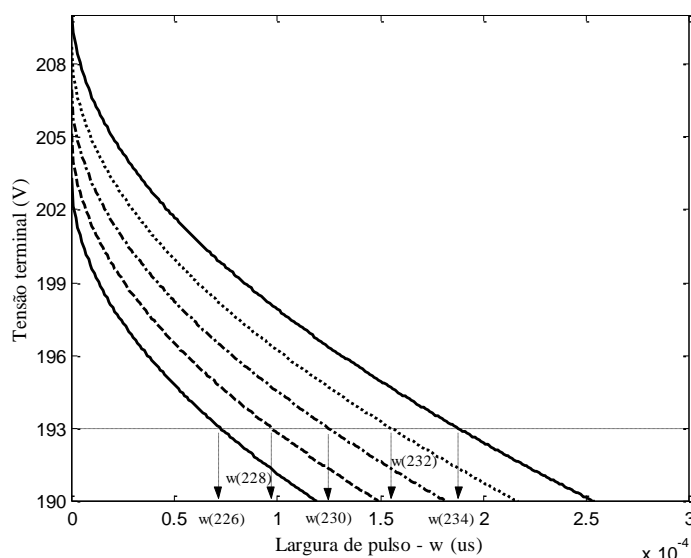


**Figura 5 - Micro central elétrica com gerador CC**

Fonte - Autoria própria

### 2.4.1 Resultados para gerador cc

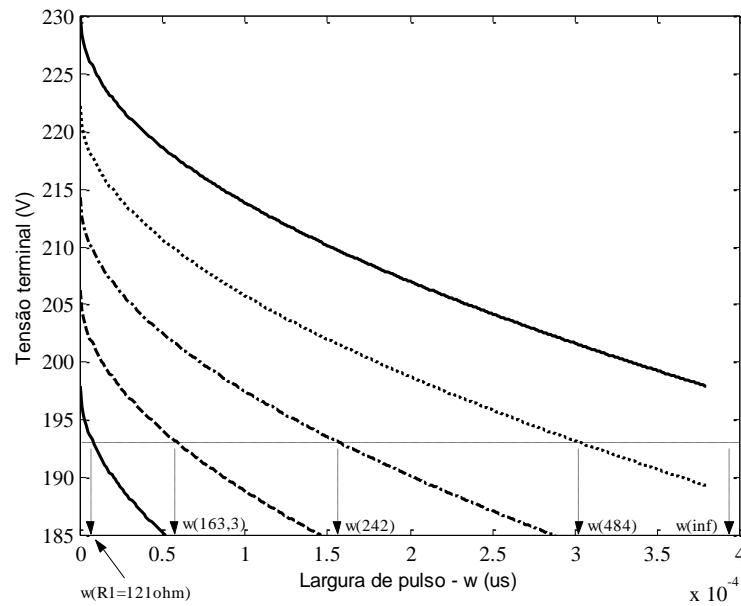
Os resultados (apresentados na sequência) obtidos a partir de experimento em laboratório para essa primeira análise são positivos em relação à regulação de tensão. Para a análise, foi considerado como carga principal e carga “dump”, lâmpadas de 100W/220V, cujas cargas foram limitadas em 400W. Acrescentando e decrementando a carga principal, foi possível verificar algumas características de resposta da regulação de tensão. As figuras 6 e 7 representam a tensão terminal, podendo ser mantida aproximadamente constante em 193 V, a despeito de variações na energia primária (traduzida na variação da f.e.m. gerada), e na carga (representada pela variação da resistência da carga principal). Na figura 6, é apresentada a adaptação da largura de pulso para diferentes forças eletromotrizes derivadas da energia primária (volt), no sentido de anular a regulação de tensão.



**Figura 6 – Variação da carga “dump” (representada pela largura de pulso  $w$ ) com a variação de f. e. m. do gerador.**

Fonte - Autoria própria

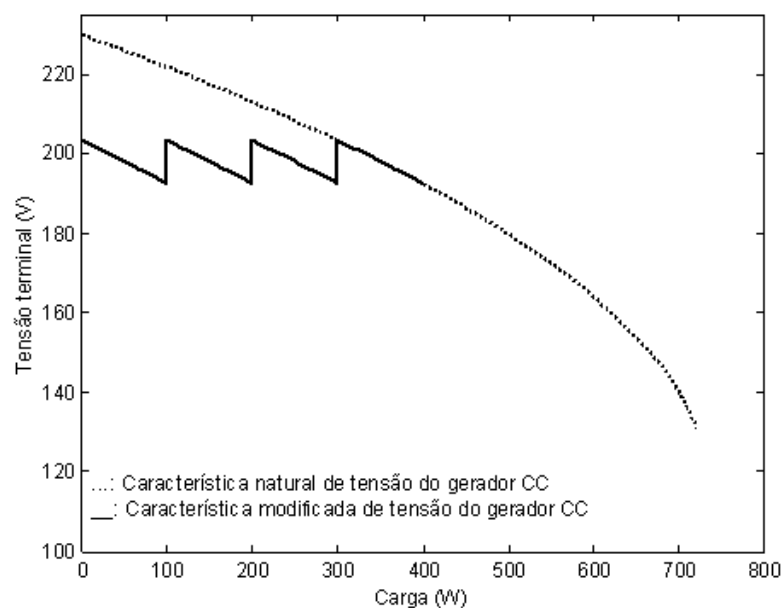
A Figura 7 apresenta uma segunda situação em que a energia primária é mantida constante, e a carga principal varia de acordo com sua demanda. Neste caso, se a corrente da carga principal aumentar/diminuir, a largura de pulso na carga “dump” será reduzida/incrementada, respectivamente, de modo a manter a tensão constante nos terminais do gerador da micro central.



**Figura 7 - Tensão para fonte constante e carga variante**

Fonte - Autoria própria

Na Figura 8 é apresentado o comportamento da tensão terminal para um caso natural e quando modificado. O caso natural (representado pela curva pontilhada) corresponde à tensão nos terminais do gerador para uma carga constante. Já o caso modificado (representado pela curva contínua), corresponde à variação de tensão nos terminais do gerador para uma variação na carga principal. Dessa forma, pode-se verificar que com o controle de carga “dump” contribui para manter uma tensão terminal aproximadamente constante.



**Figura 8 - Características natural e modificada de tensão do gerador CC**

Fonte - Autoria própria

Para verificar o comportamento em regime permanente do sistema apresentado, foram realizadas variações intencionais na carga principal, reduzindo-se a sua potência, desde um valor máximo até zero.  $R_1$  se constituiu inicialmente de quatro lâmpadas incandescentes de 100W/220V. A carga auxiliar  $R_2$  foi formada também pelo mesmo número de lâmpadas de mesma potência nominal, porém submetidas à modulação PWM. A partir desse ponto inicial, as lâmpadas da carga principal foram retiradas uma a uma, e registradas as larguras de pulso respectivas. A Tabela 1 resume os principais resultados do ensaio.

**Tabela 1- Resultados do ensaio preliminar**

Pto.	w( $\mu$ s)	$R_{20}(\Omega)$	$I_1(A)$	$I_{2m}(A)$	$I_{20}(A)$	$P_1(W)$	$P_2(W)$
1	0	$\infty$	1,730	0,000	0,000	334	0
2	52	327	1,296	0,447	0,590	250	114
3	156	188	0,862	0,894	1,022	166	197
4	260	146	0,428	1,125	1,319	83	254
5	380	121	0,000	1,600	1,600	0	308

**Fonte – Autoria própria**

**Onde:**

**$I_a$ : Corrente de armadura**

**$I_1$ : Corrente da carga principal  $P_1$**

**$I_2$ : Corrente da carga secundária  $P_2$**

**w: Largura de pulso**

## 2.5 GERADOR SÍNCRONO

### 2.5.1 Análise das tensões para variações de potência

A Figura 9 apresenta um diagrama equivalente para uma fase de um gerador síncrono, onde  $R_a$  é a resistência de armadura e  $X_s$  é reatância síncrona. Além disso,  $Z_L$  representa a potência equivalente nas cargas  $Z_1$  e  $Z_2$ ,  $V$  é a tensão nos terminais do gerador e  $E$  é a tensão de armadura. A partir deste diagrama é obtida uma equação genérica que relaciona as principais variáveis do sistema.

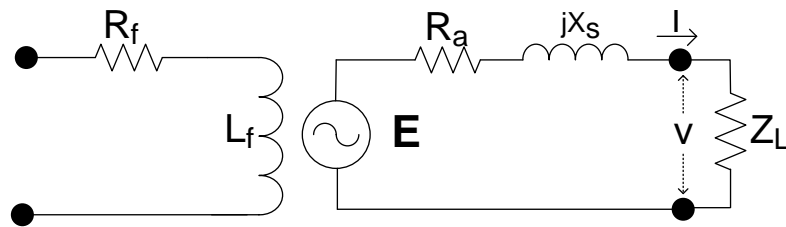


Figura 9 – Diagrama de tensões equivalentes para decremento de potência em  $Z_1$

Fonte - Autoria própria

A figura 10 apresenta um diagrama de tensões equivalente para variações de potências. Onde  $\delta$  é o ângulo entre  $E$  e  $V$ ,  $\varphi$  é ângulo relacionado com o fator de potência. Uma vez que é esperado manter a tensão terminal constante,  $V$  será representado na referência  $0x$ .  $I R_a$  e  $I X_s$  correspondem as quedas de tensão na resistência de armadura e na reatância síncrona respectivamente. Dessa forma, a partir desse diagrama é verificado o “comportamento” de  $V$ , para diferentes fatores de potência.

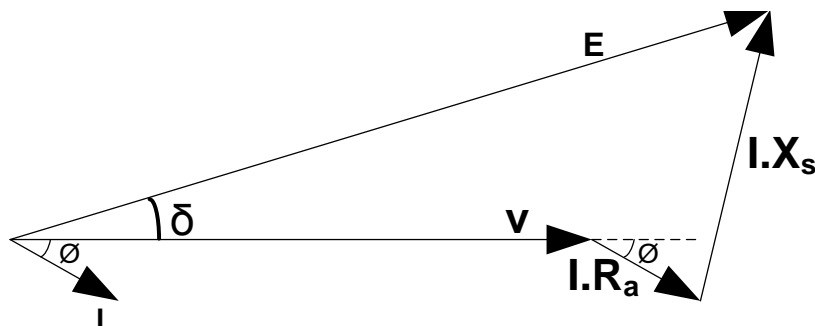


Figura 10 – Diagrama de tensões equivalentes

Fonte - Autoria própria

Para o caso de cargas ( $Z_1 + Z_2$ ) totalmente resistivas, implicará em fator de potência unitário, com a corrente  $I$  em fase com a tensão  $V$  ( $\phi=0$ ), portanto, o diagrama de tensões correspondente é conforme representado na figura 11.

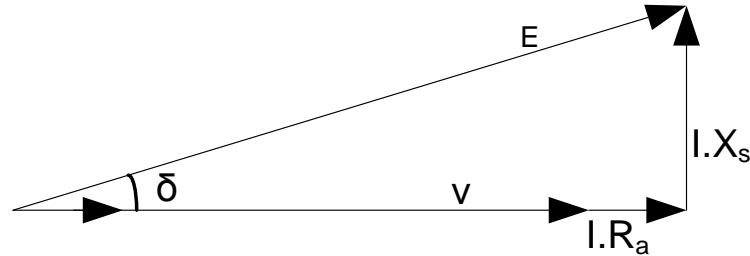


Figura 11 – Diagrama de tensões equivalentes para fator de potência unitário

Fonte - Autoria própria

A figura 12 representa a análise de fator de potência indutivo, caso em que ocorre aumento de potência em  $Z_1$ , ocasionando um decréscimo ( $V-V'$ ) na tensão terminal e uma variação ( $\delta - \delta'$ ) no ângulo de fase  $\delta$ , o qual assumira um novo valor correspondente a  $\delta'$ . Sendo assim, para que o sistema se reestabeleça novamente na tensão terminal inicial  $V$ , a potência dissipada em  $Z_2$  deverá ser diminuída proporcionalmente ao acréscimo de potência em  $Z_1$ .

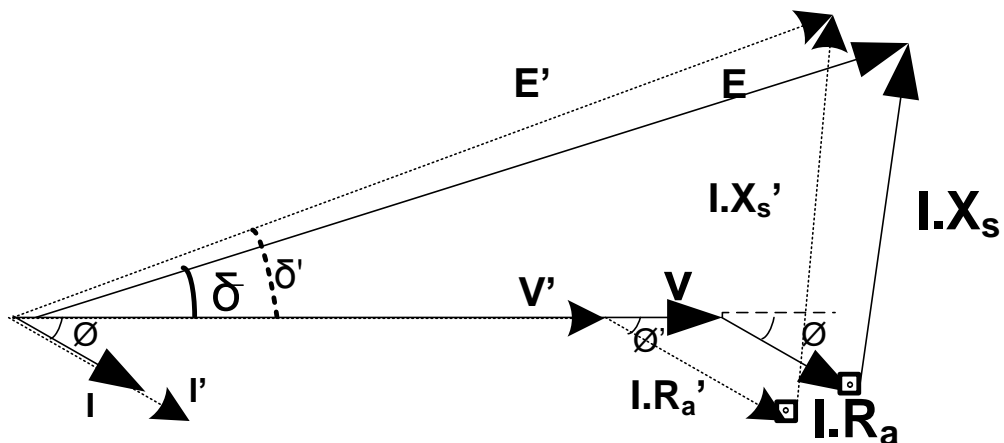


Figura 12 – Diagrama de tensões equivalentes para aumento de potência em  $Z_1$

Fonte - Autoria própria

A figura 13 representa um segundo caso, onde ocorre o inverso da análise da figura 12, ou seja, agora a potência em  $Z_1$  (com fator de potência capacitivo) é decrementada implicando em um aumento  $(V'-V)$  em  $V$ . Assim, para regular a tensão dos terminais do gerador deve-se aplicar o procedimento inverso ao caso da Figura 12, incrementando a potência dissipada em  $Z_2$  proporcional ao decréscimo da potência de  $Z_1$ .

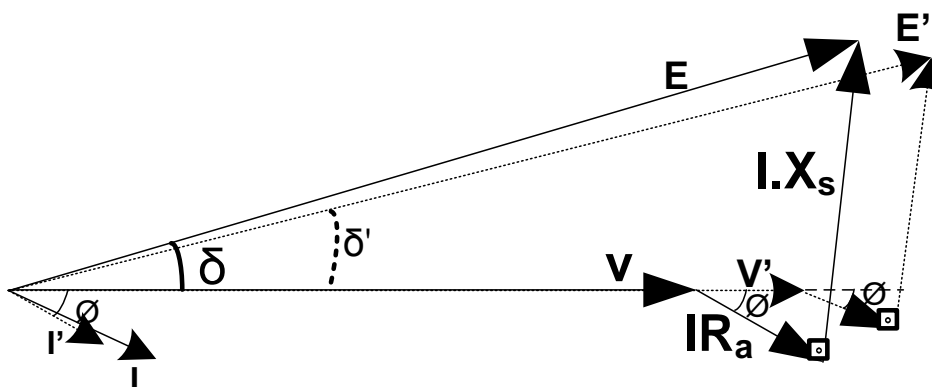


Figura 13 – Diagrama de tensões equivalentes para decremento de potência em  $Z_1$

Fonte - Autoria própria

Dessa forma, considerando os parâmetros do circuito equivalente da figura 9 e o diagrama de tensões da figura 14, na sequência seguem as deduções.

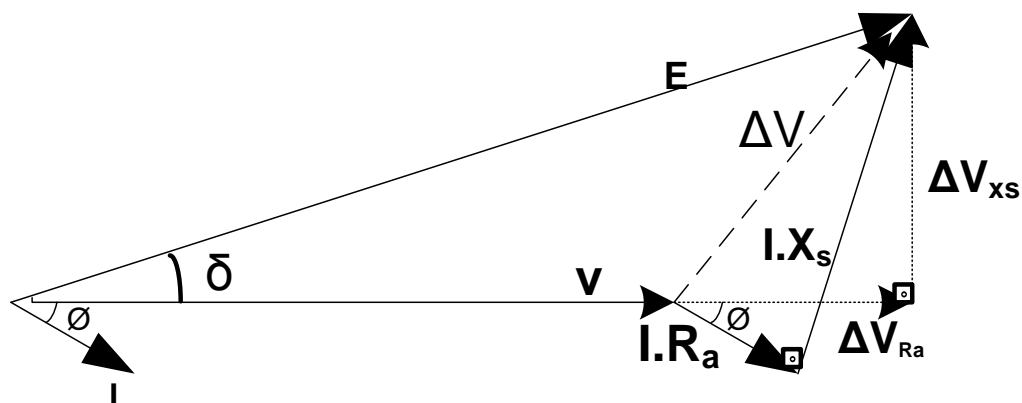


Figura 14 – Diagrama de tensões

Fonte - Autoria própria

Inicialmente considera-se a tensão de armadura  $E$  conforme a equação 1, a qual depende do número de espiras, do fluxo magnético e da frequência.

$$E = 4.44N\phi f \quad (1)$$

Agora, analisando o digrama da figura 14 e conforme já foi representado nos diagramas das figuras 12 e 13, verifica-se que toda variação na potência da carga  $Z_L$ , causa alterações em  $V$ , devido à alteração de  $\phi$ . Portanto, a equação 2 considera uma variação  $\Delta V$  para mudanças de  $Z_L$ .

$$\Delta V = E - V = Z_a I \quad (2)$$

Onde:  $Z_a = R_a + jX_s$

As equações (3) e (4) relacionam a potência com a matriz admitância  $Y$  e com a potência ativa e reativa respectivamente.

$$S = VI = V^2 G + jV^2 B = V^2 Y \quad (3)$$

$$S = P + jQ \quad (4)$$

Onde  $G$ : Condutância e  $B$ : Susceptância;

A equação (5) representa a corrente  $I$  do circuito equivalente da figura 10.

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{P - jQ}{V} \quad (5)$$

Substituindo (2) em (5), obtém-se a equação (6) correspondente ao acréscimo de tensão  $\Delta V$  em  $V$  devido à variação de potência em  $Z_L$ .

$$\Delta V = R_a + jX_s * \frac{P - jQ}{V} \quad (6)$$

Rearranjando os termos da equação (6) e separando a potência em “partes” resistiva e reativa, tem-se a equação (7).

$$\Delta V = \frac{R_a + X_s Q}{V} * j \frac{X_s P - R_a Q}{V} \quad (7)$$

Da equação 2, a tensão de armadura  $E$  pode ser representada conforme a equação (8).

$$E = V + \Delta V \quad (8)$$

Substituindo (7) em (8), a tensão de armadura  $E$  pode ser representada conforme equação (9).



$$E^2 = \left( V + \frac{R_a P + X_S Q}{V} \right)^2 + \frac{X_S P - R_a Q}{V}^2 \quad (9)$$

Assumindo que:

$$P = VI \cos(\varnothing) \quad (10)$$

$$Q = VI \sin(\varnothing) \quad (11)$$

Assim, substituindo (10) e (11) em (9), tem-se uma nova equação para **E**, conforme apresentado em (12).

$$E^2 = V + \frac{R_a VI \cos(\varnothing) + X_S VI \sin(\varnothing)}{V}^2 + \frac{X_S VI \sin(\varnothing) - R_a VI \cos(\varnothing)}{V}^2 \quad (12)$$

Simplificando a equação (13), obtêm-se o polinômio do segundo grau, representado na equação (14).

$$V^2 + 2R_a I \cos \varnothing + 2X_S I \sin \varnothing + R_a^2 I^2 + X_S^2 I^2 - E^2 = 0 \quad (13)$$

Substituindo a equação (1) em (13), obtêm-se a equação (14), de segunda ordem, para a tensão **V** nos terminais do gerador a qual é função da: corrente de carga, fator de potência, frequência, fluxo magnético do entreferro, resistência de armadura e reatância síncrona.

$$V^2 + 2R_a I \cos \varnothing + 2X_S I \sin \varnothing + R_a^2 I^2 + X_S^2 I^2 - 4.44 N \varphi f^2 = 0 \quad (14)$$

## 2.5.2 Resultados do gerador síncrono

A partir da equação 14, utilizando-se do software de simulação *Matlab*, faz-se uma análise da regulação de tensão para diferentes casos, com fator de potência unitário, capacitivo e indutivo. Limitou-se a potência máxima de geração de 400VA ( $S_m$ ). Além disso, para manter uma margem de segurança admite-se que a potência máxima a ser considerada nos cálculos é de 95% da potência máxima de geração, essa limitação garante que em um caso de sobretensão não ocorra falta de energia. Sendo assim, todas as simulações serão feitas considerando uma potência de 0,95% de  $S_m$ .

O Figura 15 apresenta parte de um algoritmo (algoritmo 1) para simulação de três fatores de potência diferentes,  $\cos(\phi)=1$ ,  $\cos(\phi)=0,85$  e  $\cos(\phi)=0,70$ . O código implementa a equação 14, calculando os valores da tensão  $V$  correspondentes a uma variação de potência de zero a 450VA.

```
clear all;
j = sqrt(-1);
Z =0.255+j*0.5;
R = real(Z);
X = imag(Z);
f=60;
E =224;           % e V=220 V para 60Hz
P1 = 380; Q1=0;   % Potência ativa 380W, reativa Q=0; FP=1
I1 =1.818;        % corrente em A para primeira iteração

cont1=1;
for P1=1:1:450

    S1 = sqrt(P1^2+Q1^2); % Potência reativa em VA
    Fil = (acos(P1/S1)); % Ângulo do fator de potência (Rad)

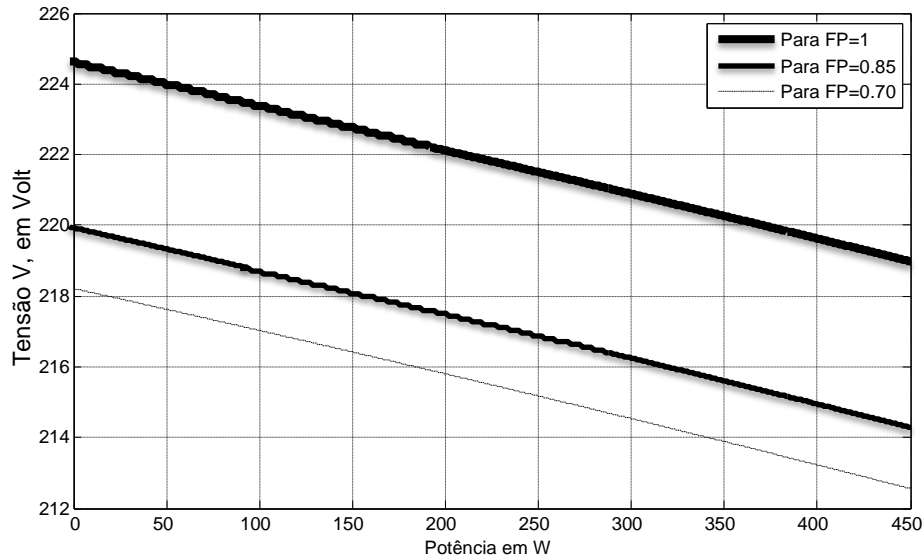
    a = 1;
    b = 2*R*I1*cos(Fil)+2*X*I1*sin(Fil);
    c = R^2*I1^2+X^2*I1^2-(3.7410*f)^2;
    V1 = (1/(2*a))*(-b + sqrt(b^2 - 4*a*c)); % Equação (14) (deduzida)
    I1 = abs(conj(S1)/V1);

    VetorI1(cont1)=I1;
    VetorV1(cont1)=V1;
    VetorS1(cont1)=P1;
    cont1=cont1+1;
end
```

**Figura 15 – Algoritmo 1 para cálculo da tensão V**

**Fonte - Autoria própria**

A figura 16 apresenta os resultados do algoritmo 1, conforme a legenda dessa figura, tem-se as retas de tensão para os diferentes fatores de potência. Verifica-se que para  $\cos(\phi)$  unitário, a tensão  $V$  nos terminais do gerador é de aproximadamente 220 Volts para uma potência de 380 W (95% de  $S_m$ ), como essa potência é escolhida como referência para esse cálculo, nota-se que para os fatores de potência inferiores ao unitário, a tensão não atingiu 220 Volts em  $0.95*S_m$ , ficando abaixo dessa escala.



**Figura 16 –Tensão V para diferentes fatores de potência**

Fonte - Autoria própria

Análogo aos cálculos feitos anteriormente para o caso de fatores de potência distintos, na figura 17 é apresentado o algoritmo 2, que tem a função de calcular a tensão **V** variando a potência de zero até 450W, para a frequência de 59Hz e considerando fator de potência unitário.

```
clear all;
j = sqrt(-1);
Z =0.255+j*0.5;
R = real(Z);
X = imag(Z);
E =224;           % E=224V para f=60Hz
f1=59;           % Frequência 59 Hz;
P = 380; Q=0;    % Potência ativa 380W, reativa Q=0; FP=1
S = sqrt(P^2+Q^2); % Potência reativa em VA
Fi = (acos(P/S)); % Ângulo do fator de potência (Rad)
I1 =1.818;       % corrente em A para primeira iteração
cont1=1;
for S=1:1:4500

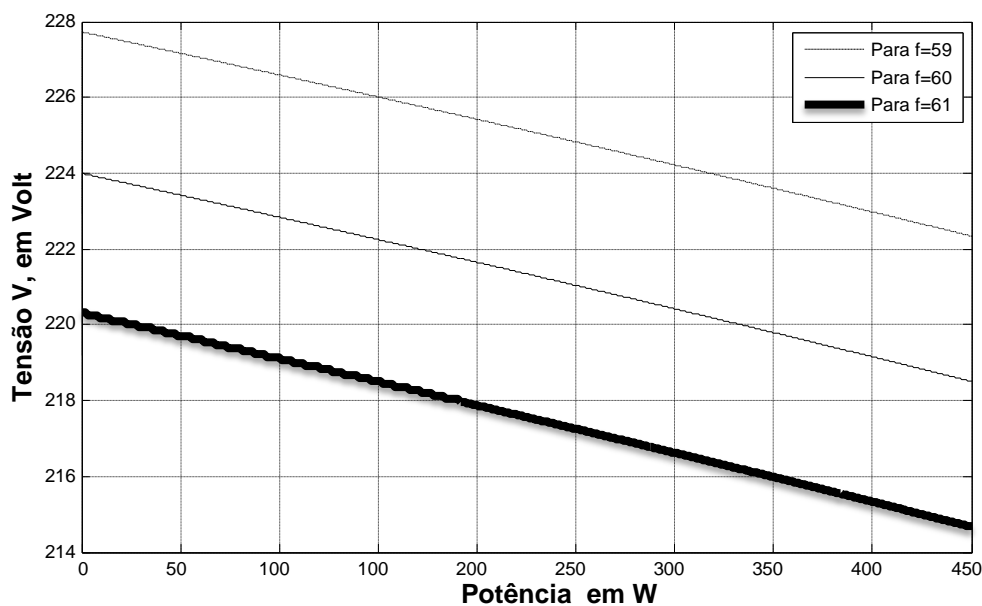
    a = 1;
    b = 2*R*I1*cos(Fi)+2*X*I1*sin(Fi);
    c = R^2*I1^2+X^2*I1^2-(3.7333*f1)^2;
    V1 = (1/(2*a))*(-b + sqrt(b^2 - 4*a*c)); % Equação (14) (deduzida)
    I1 = abs(conj(S)/V1);

    VetorI1(cont1)=I1;
    VetorV1(cont1)=V1;
    VetorS1(cont1)=S;
    cont1=cont1+1;
end
```

**Figura 17– Algoritmo 2 para cálculo da tensão V**

Fonte - Autoria própria

A figura 18 apresenta a tensão  $V$  quando calculada para frequências de 59, 60 e 61Hz, a partir dos resultados dessa figura, verifica-se que para frequência de 60 Hz, a tensão dos terminais  $V$  com potência de 380W, corresponde aos 220 Volts (considerados referência). Para essa mesma potência, com frequência de 59 Hz, a tensão  $V$  assume um valor bem inferior de aproximadamente 215 Volts. Já para a frequência de 61 Hz, tem-se 223,5 Volts (valor superior ao desejado 220 Volts) na tensão terminal com 380 W.



**Figura 18- Tensão V para diferentes frequências**

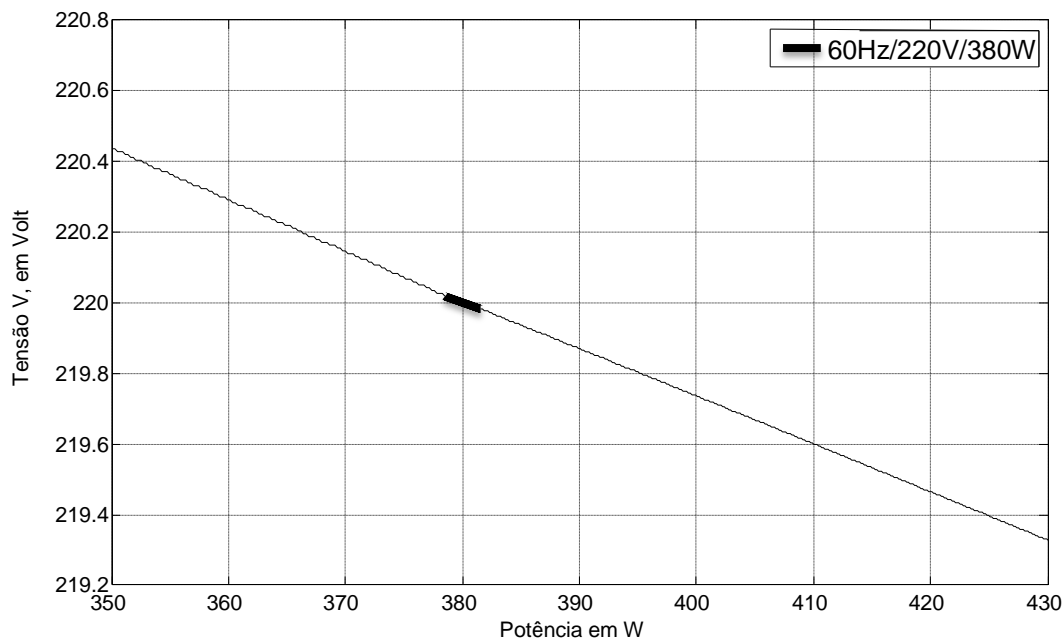
**Fonte - Autoria própria**

Conforme representado na figura 18 variando-se a frequência com a potência, é alterada a tensão dos terminais. Dessa forma, ao fazer com que a potência que o gerador alimenta seja constante, pode-se controlar a frequência e consequentemente a regular tensão.

A Figura 19 apresenta a tensão de operação desejada para o gerador síncrono utilizando cargas “dump”. Assim, nessa figura verifica-se uma estreita faixa de tensão centrada em 220 Volts. Uma vez que a frequência seja mantida em 60Hz, a tensão deve obrigatoriamente ajustar-se em 220 Volts. Caso a frequência diminuir, a carga “dump” será acionada ou desativada para garantir novamente a frequência constante.

Além disso, nessa figura é proposta uma faixa na qual a tensão vai variar a cada vez que ocorrer alteração na potência da carga principal e da carga “dump”.

Essa pequena variação corresponde ao intervalo de tempo de ajuste das potências carga auxiliar e de  $Z_L$ .

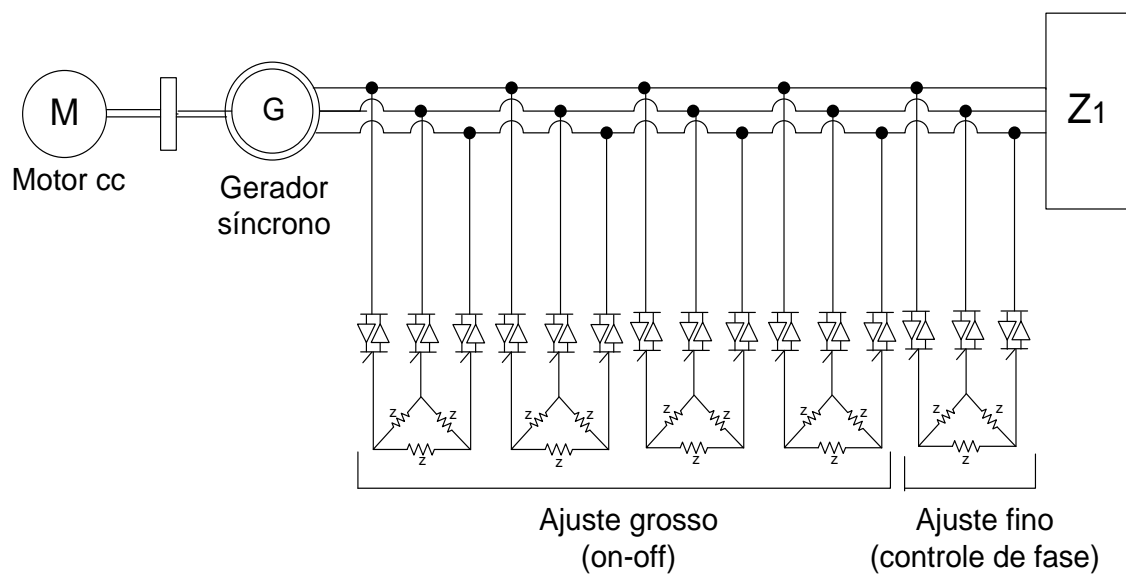


**Figura 19- Regulação da Tensão V em 60Hz/220V/380W**

Fonte - Autoria própria

### 2.5.3 Sistema proposto para o desenvolvimento do estudo

O sistema proposto para acionamento da carga “dump” usado para analisar a influência do controle de frequência é apresentado na Figura 20. Nesta figura é utilizado um motor de corrente contínua (com função de turbina) acoplado ao gerador síncrono trifásico. Nos terminais do gerador está conectada a carga principal  $Z_1$ . A regulação de tensão, para efeito de ajuste grosso de frequência, é feita através do chaveamento (“on-off”) das cargas auxiliares (representadas como ‘z’ na Figura 20) conectadas em paralelo no sistema. Com relação ao ajuste fino, será usado o controle de fase. Os dispositivos a serem utilizados são triac’s.



**Figura 20 - Micro central elétrica com gerador síncrono e controle de frequência**  
**Fonte - Autoria própria**

## 2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a avaliação econômica, foi usado um critério que assegura que os recursos estão sendo utilizados do modo mais econômico possível. Utilizou-se um procedimento baseado no método dos custos incrementais iguais, que envolve um multiplicador de Lagrange. Dessa forma, ao invés de simplesmente optar pela alternativa de melhor custo/benefício, todas elas são adotadas na proporção direta do seu custo benefício, de modo que o custo total de geração fique minimizado. No caso, temos duas alternativas para o controle de frequência e tensão (ou de geração), onde a primeira alternativa é utilizar um regulador de velocidade (onde está subentendido um reservatório d'água), enquanto a segunda é operar a fio d'água (sem reservatório), e utilizar uma carga "dump" para executar o controle. O resultado do procedimento oferece o montante de potência ativa que deverá ser controlada pelo regulador de velocidade e o montante que deverá ser controlado pela carga "dump", para que os custos totais sejam mínimos. Porém, antes de tudo deverão ser formadas as equações de custos para cada uma das alternativas.

### 2.6.1 Formação das equações de custo

No método de custos incrementais iguais, é fundamental relacionar os custos com a potência gerada. Anderson e Herman apresentam esse método aplicado em despacho ótimo de geradores de energia elétrica. No entanto, os conceitos de cálculo podem ser estendidos para diversos problemas que envolvem um grande número de variáveis. O método consiste em determinar uma função de custo quadrática para cada "planta", no presente caso será determinada uma equação para o regulador de velocidade e uma segunda equação para a carga "dump".

Basicamente o coeficiente fixo dos custos, para ambas alternativas depende predominantemente da remuneração do investimento realizado para a implementação de uma capacidade, ou custo de capital (principalmente o custo inicial), bem como da vida útil da unidade geradora. Os custos variáveis estão associados à utilização da capacidade, englobando operação, manutenção, perdas adicionais, aumento da carga própria e custos de oportunidade (não realização de receitas, ou impedimento de venda da energia elétrica).

Seguindo a metodologia de Anderson e Herman, a curva de custos pode ser representada conforme a equação 15.

$$C_i P_{Gi} = \alpha + \beta P_{Gi} + \gamma P_{Gi}^2 \quad (15)$$

Onde i: índice de unidades;

$C_i$ : custo operacional da unidade;

$P_{Gi}$ : potência gerada pela unidade i;

A partir dos conceitos apresentados, define-se o custo por hora \$/h conforme equação 17.

$$C_1 f P_{G1} , C_2 f P_{G2} , \dots , C_n f P_{Gn} \text{ em } \$/h \quad (17)$$

A partir da equação 15 o custo total será soma de todos os custos, conforme equação 18.

$$C_T = C_1 f P_{G1} + C_2 f P_{G2} + \dots + C_n f P_{Gn} \text{ em } \$/h \quad (18)$$

Como requer custo total  $C_T$  mínimo, os cálculos devem respeitar as restrições das equações 19 e 20, ou seja, que a potência gerada seja igual à potência demandada e que haja um limite mínimo e máximo para as potências geradas.

$$P_{Gi} = P_D \quad (19)$$

$$\min \leq P_{Gi} \leq \max \quad (20)$$

Considerando as equações 19 e 20, tem-se que o custo total será dado pela equação 21.

$$\zeta_T = C_T - \lambda (P_G - P_D) \quad (21)$$

Para determinação das equações de custos do sistema proposto, é feita uma análise considerando a utilização do regulador de velocidade e da carga “dump”. Dessa forma, a tabela 2 apresenta a participação de cada fator nos coeficientes das equações. São utilizados onze fatores que originam os custos, cada fator é avaliado em uma escala de zero até 100, e então atribuído um valor para cada coeficiente. Na tabela 2, os coeficientes da equação 15  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , são



respectivamente os fatores Fixo, Linear e quadrático. A equação final é a inserção do total de coeficientes na equação 15.

**Tabela 2 – Determinação das equações de custos (estimativas)**

Item	Natureza do custo	Regulador de velocidade (RV): coeficientes			Carga "dump" (CA): coeficientes		
		Fixo	Linear	Quadrático	Fixo	Linear	Quadrático
1	Obra Civil	10			5		
2	Regulador	10			1		
3	Operação		10			10	
4	Manutenção		10			8	
5	Tempo de resposta		4			0	
6	Eficiência			0,005 (Parte da potência gerada é usada no motor hidráulico)			0
7	Custo de oportunidade			0			0,01
8	Aceitação			0,01			0,01
9	Meio Ambiente			0,007			0
10	Regularização			0			0,01
11	Vida útil	---			---		
12	<b>Valor médio</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>0,0044</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>0,006</b>
13	<b>C<sub>RV</sub></b>	<b>10+8P<sub>G1</sub>+0,0044P<sub>G1</sub><sup>2</sup></b>					
14	<b>C<sub>CA</sub></b>				<b>3+6P<sub>G2</sub>+0,006P<sub>G2</sub><sup>2</sup></b>		

**Fonte – Autoria própria**

**Onde:**

**C<sub>RV</sub>: Equação de custo para o reservatório e o regulador de velocidade**

**C<sub>CA</sub>: Equação de custo para carga “dump”**

Portanto, com base na tabela são obtidas as equações 22 e 23, que correspondem às equações de custo do sistema proposto.

$$C_{RV} = 10 + 8P_{G1} + 0,0044P_{G1}^2 \quad (22)$$

$$C_{CA} = 3 + 6P_{G2} + 0,006P_{G2}^2 \quad (23)$$

A equação 24 satisfaz a condição de custo mínimo, onde a derivada do custo total deve ser igual a zero.

$$\frac{\partial C_T}{\partial P_G} = 0 \quad (24)$$

Portanto, considerando o critério da equação 24, a equação 21 terá a forma da equação 25.

$$\frac{\partial \zeta_T}{\partial P_G} = \frac{\partial C_T}{\partial P_G} - \lambda \left( \frac{\partial P_G}{\partial P_G} - \frac{\partial P_D}{\partial P_G} \right) = 0 \quad (25)$$

Resolvendo a equação 25 para  $\lambda$ , tem-se a equação 26.

$$\lambda = \frac{\partial C_T}{\partial P_G} \quad (26)$$

Onde  $\lambda$  corresponde ao custo incremental IC.

Assim, a equação 27 representa o custo incremental para o reservatório e o RV. Análogo, a equação 28 representa o custo incremental com carga “dump”.

$$\lambda = \frac{\partial C_1}{\partial P_{G1}}, \quad em \$/wh \quad (27)$$

$$\lambda = \frac{\partial C_2}{\partial P_{G2}}, \quad em \$/wh \quad (28)$$

Uma vez definido as equações dos custos (equações 22 e 23), serão resolvidas para uma demanda máxima ( $P_D = P_{G1} + P_{G2}$ ) de 100 KW. Dessa forma, relacionando as equações 22 e 23 com o custo incremental, as novas equações dos custos serão conforme as equações 30 e 31.

$$IC_1 = 8 - 0,0088P_{G1}, \quad em \$/wh \quad (30)$$

$$IC_2 = 6 + 0,012P_{G2}, \quad em \$/wh \quad (31)$$

A melhor estratégia é admitir custos incrementais iguais para simplificar as equações, conforme representado na equação 29.

$$IC_1 = IC_2 = \lambda, \quad em \$/wh \quad (32)$$

Assim, resolvendo um sistema de equações conforme representado em 33, chega-se aos valores das potências geradas  $P_{G1}$  e  $P_{G2}$ , representadas pelas equações 34 e 35 respectivamente.

$$8 - 0,0088P_{G1} = 6 + 0,012P_{G2} \quad (33)$$

$$P_{G1} + P_{G2} = 380$$

$$P_{G1} = 123,08 \text{ W} \quad (34)$$

$$P_{G2} = 256,92 \text{ W} \quad (35)$$

### 3. CONCLUSÃO

O estudo permite fazer algumas afirmações, cujas mais relevantes são as seguintes. A geração de energia elétrica de pequeno porte, numa estrutura onde o regulador de velocidade mecânico é substituído por uma carga auxiliar eletrônica, fica muito simplificada. Para o caso de gerador cc, pode-se atestar a viabilidade técnica para a regulação de tensão com este esquema proposto, o que foi indicado pelos valores obtidos. Para gerador ca, por enquanto foi estabelecido a parte teórica.

As principais conclusões são:

- 1- O controle de velocidade (frequência) tipo carga “dump” contribui favoravelmente para a regulação de tensão;
- 2- Com relação à viabilidade econômica foi utilizado um procedimento baseado no método de custos incrementais iguais, e para um micro aproveitamento típico as porcentagens médias para uso do RV foi de 32,38 % e para o uso de carga “dump” foi de 67,62 %.

Para o estudo feito utilizando a geração de energia elétrica com gerador síncrono, verificou-se que o controle de frequência contribuiu para uma regulação de tensão aceitável. A equação engloba praticamente todas as variáveis influentes na tensão dos terminais do gerador. A utilização dessa equação em forma de simulações indica uma regulação de tensão coerente e aceitável para fatores de potência unitários.

#### 4. REFERÊNCIAS

Bannura, L. G., Mardones, V. A., Solar, M. E., Nuevo Sistema de Regulacion de Voltaje y Frecuencia en Microcentrales Hidroelectricas, VII Congreso Chileno de Ingenieria Eléctrica, Santiago, Nov. 1987.

Datta, A. K., A Thyristor-Chopper-Controlled Self-Excited Syn-chronous Machine for Isolated Power Supply, Proceedings of the IEEE, may 1973.

Kosow, Inving L., Máquinas Eletricas e transformadores, 15. Ed. 1919, ISBN:85-250-0230-5.

Henderson, D., An Advanced Electronic Load Governor for Control of Micro Hydroelectric Generation, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 13, No. 3, Sept. 1998.

Subramanian, K., Ray, K. k., Voltage Regulation of 3- $\Phi$  Self Excited Asynchronous Generator, International of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 2(12), 2010, ISSN: 0975-5462.

Watanabe, E. H. Maier, P. G. G., Barros, Jr., J. D. A., Hirata, M. H., Controlador de Gerador para Aproveitamento Eólica, 60 Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1996.

Esperón, M. C., Control Jerárquico de la Frecuencia em Sistemas e potencia interconectados, Tesis para obtener el grado de Maestro em Ciencias en la especialidade de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., Guadalajara, octubre del 2004.

Anderson. T., Migliore. H., Power System Economic Dispatch, Portland State University, agosto de 2010.