

Desenvolvimento de uma fonte contínua baseada em componentes de potência para aplicações magnéticas

Antonio Anderson Pereira dos Santos
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido
Mossoró, Brasil
anderson.pereira.n2@hotmail.com

Isaac Barros Tavares da Silva
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido
Mossoró, Brasil
isaac.barros@ufersa.edu.br

Juan Rafael Filgueira Guerra
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido
Mossoró, Brasil
nauj_rafael@hotmail.com

Resumo— Esta pesquisa refere-se ao desenvolvimento de uma fonte contínua para aplicações magnéticas em um solenoide. O principal objetivo é o dimensionamento dos componentes do projeto e sua simulação. Um conversor buck com uma ponte retificadora foi usado para diminuir a tensão neste projeto. Os resultados permitem o diagnóstico da viabilidade da fonte, bem como de suas aplicações.

Palavras chave— Fonte contínua, Aplicações magnéticas, Conversão de tensão, Simulação

I. INTRODUÇÃO

O aumento da pesquisa em sistemas de telecomunicações implica na necessidade de aumento do desenvolvimento de técnicas para diversificar as aplicações magnéticas. Estudos nesta área foram impulsionados por necessidades como esta, como a análise de reconfiguração de parâmetros de dispositivos radiadores de campo eletromagnético[1].

Com o aumento das pesquisas referentes ao estudo de reconfiguração de parâmetros de antenas, fez-se necessário a busca por formas de produção e variação de campo magnético que possam gerar tal reconfiguração[2].

Este trabalho apresenta a elaboração do projeto de uma fonte contínua para alimentação de um solenoide, que por sua vez, produz um campo magnético controlado. Tal campo pode influenciar os parâmetros de antenas e ser útil para diversas aplicações magnéticas. O trabalho demonstra o planejamento do solenoide e da fonte, além da simulação da funcionamento do sistema.

Com base no estudo de conversores de corrente contínua e suas respectivas topologias, será realizada a escolha do conversor mais adequado, assim como a elaboração do circuito retificador que alimentará a fonte.

O projeto do solenoide e seus respectivos parâmetros será realizado com base no estudo do material, assim como o estudo do equacionamento referente a geração de campo magnético.

II. APLICAÇÕES MAGNÉTICAS

Através da variação do campo magnético estático de polarização externo é possível obter características de propagação diferentes [3]. A alteração de propriedades é útil, pois muitos projetos por fatores de utilização necessitam de sintonias externas de frequência de ressonância.

Tal processo de reconfiguração de propriedades através da variação de campo magnético externo é feito, geralmente submetendo o dispositivo a um campo magnetostático externo que, em função de fatores como intensidade e direção, influenciam de forma direta em parâmetros do material e, desta forma, os parâmetros da estrutura[3].

Materiais como a ferrita, que é do tipo cerâmico, possuem diversas aplicações tecnológicas. Apresentam resistividade muito alta, permeabilidade magnética tensorial e permissividade elétrica relativa escalar, entre 10 e 15 [4]. O tensor de Polder descreve as propriedades magnéticas deste material de acordo com a orientação do campo magnético aplicado. O tensor de permeabilidade magnética para um campo magnetostático nas direções x, y e z é dado respectivamente pelas equações 1, 2 e 3.

$$\bar{\mu}_x = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_r & -jk_r \\ 0 & jk_r & \mu_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{\mu}_y = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & 0 & -jk_r \\ 0 & 1 & 0 \\ jk_r & 0 & \mu_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\bar{\mu}_z = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & -jk_r & 0 \\ jk_r & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do ar. Os termos μ_r e k_r nas três direções são descritas como:

$$\mu_r = 1 - \frac{\gamma^2 H_0 4\pi M_s}{f^2 - (\gamma H_0)^2} \quad (4)$$

$$k_r = \frac{\gamma 4\pi M_s}{f^2 - (\gamma H_0)^2} \quad (5)$$

Onde:

$\gamma \rightarrow$ Razão giromagnética da ferrita

$4\pi M_s \rightarrow$ Magnetização de saturação

$H_0 \rightarrow$ Intensidade do campo magnetostático aplicado

$f \rightarrow$ Frequência

São diversos os estudos que realizam pesquisa sobre a influência de um campo magnético variável em dispositivos com características de propagação. Experimentos realizados por Petosa et al [1] sobre reconfiguração de DRA (*Dielectric Resonator Antenna*) através de aplicação de campos magnéticos variáveis denotam a versatilidade da utilização de compostos de ferrita FRA (*Ferrite Resonator Antenna*), pois apresentaram alterações de frequência de ressonância 8% acima em aplicações paralelas com relação à frequência de ressonância sem a aplicação do campo. Para perpendiculares, valores até 8% abaixo da frequência de referência.

Tal alteração nos valores de frequência de ressonância influencia em parâmetros como perda de retorno destes dispositivos [4]. A Figura 1 apresenta a influência do campo magnético de corrente contínua sobre a perda de retorno de uma FRA em função da frequência.

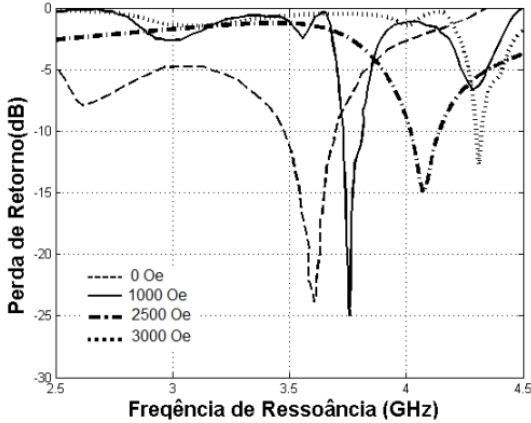


Fig. 1. Perda de retorno para uma de FRA com variação de campo magnético de polarização. [4]

Observa-se através da Figura 1 que a variação do campo magnético faz com que haja um efeito de desvio na frequência de ressonância.

A aplicação de um campo magnético pode alterar a polarização de uma FRA entre circular e linear. Esta diferença de polarização altera valores de perda de retorno e padrões de radiação do dispositivo [2]. Desta forma, o estudo sobre como é produzido um campo magnético é de grande importância, assim como compreender o seu equacionamento.

A. Equacionamento do Campo Magnético –Lei de Biot-Savart

Levando em consideração uma espira circular localizada no plano x-y, de raio R e perímetro l , com eixo na direção z apresentada na Figura 2, onde flui corrente elétrica i . A lei de Biot-Savart determina o campo magnético gerado por uma corrente elétrica através da Equação 6 [5].

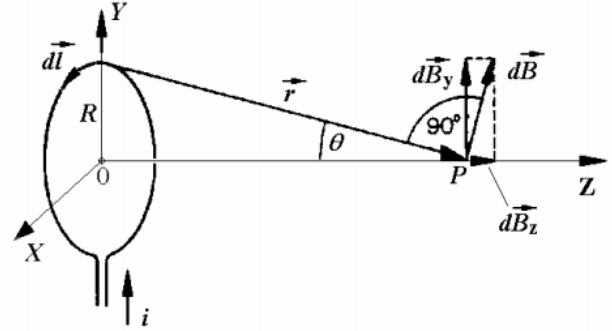


Fig.2. Diagrama de campo magnético de uma espira. [5]

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i \cdot d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^2} \quad (6)$$

A corrente elétrica que flui pela espira é representado por i . O vetor unitário $d\vec{l}$ de comprimento na direção de i . $\vec{r}$ é o vetor posição do ponto P , onde está sendo calculado o campo magnético.

A Equação 6 se torna a Equação 7 levando em consideração que a distância entre o elemento de comprimento e o ponto P é o módulo do vetor r .

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i \cdot dl}{4\pi (z^2 + R^2)} \quad (7)$$

As componentes de r são:

$$dB_z = dB \cdot \cos\theta = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dl}{(z^2 + R^2)} \frac{R}{(z^2 + R^2)^{1/2}} \quad (8)$$

$$dB_y = dB \cdot \sin\theta = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dl}{(z^2 + R^2)} \frac{R}{(z^2 + R^2)^{1/2}} \quad (9)$$

Deve-se integrar a Equação 8 ao longo de toda a extensão da espira para se encontrar a componente B_z do campo magnético.

$$\int dB_z = \int \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dl}{(z^2 + R^2)} \frac{R}{(z^2 + R^2)^{1/2}} \quad (10)$$

$$B_z = \int \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{R}{(z^2 + R^2)^{1/2}} dl \quad (11)$$

Observando que a integração ocorre em todo o perímetro da espira, a única grandeza que não é constante é dl , logo:

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi} \frac{R}{(z^2 + R^2)^{1/2}} \int dl \quad (12)$$

A integral de dl é dada pelo comprimento da circunferência, logo:

$$\int dl = 2 \cdot \pi \cdot R \quad (13)$$

Desta forma, o valor do campo magnético B_z ao longo do eixo da espira é dado por:

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi} \frac{R}{(z^2 + R^2)^{3/2}} 2 \cdot \pi \cdot R \quad (14)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot i}{2} \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (15)$$

A partir da formulação do campo magnético para uma espira é possível expandir o conceito para uma bobina de N espiras e de mesmo raio R . Tais espiras são enroladas de forma compacta. Leva-se em consideração que todas as espiras fornecem a mesma contribuição para o campo magnético. Deste modo, o campo total é N vezes o campo de uma única espira [5].

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot i}{2} \frac{N \cdot R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (16)$$

O cálculo do campo magnético é dado pelo campo de uma única espira multiplicando pela densidade de espiras N/L e integrando sobre o comprimento da bobina. O resultado desta integração é descrito na Equação 17.

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot N}{2 \cdot L} \left(\frac{\alpha}{(r^2 + \alpha^2)^{1/2}} - \frac{\beta}{(r^2 + \beta^2)^{1/2}} \right) \quad (17)$$

A partir da Equação 17, levando em consideração que $z = 0$ e $\alpha = z + L/2$, $\beta = z - L/2$. Desta forma, a equação simplificada para o cálculo do campo magnético no centro de uma bobina de N espiras é dada por:

$$B_z(0) = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot N}{2} \left(r^2 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (18)$$

A partir da Equação 18, percebe-se que é necessária a aplicação de uma corrente contínua no solenoide para que o mesmo produza um campo magnético. É possível perceber também que quanto maior a corrente aplicada maior será o campo magnético produzido. Com base nisso, nota-se que a elaboração de uma fonte contínua adequada para alimentar o solenoide é de grande importância para a realização do projeto.

III. PROJETO DA FONTE DE CORRENTE CONTÍNUA

Este tópico apresenta a fundamentação teórica dos componentes de potência necessários para a elaboração dos circuitos que compõem a fonte corrente contínua, com suas respectivas formulações e considerações.

A. Conversor CC-CC Abaixador (Conversor Buck)

Os conversores CC-CC são amplamente utilizados, pois apresentam várias aplicações e são de fácil compreensão. Aumentar ou diminuir um nível de tensão é muito útil e conveniente para alimentação de cargas [6].

Os principais circuitos conversores CC-CC são: o abaixador (*buck*), elevador (*boost*) e abaixador-elevador (*buck-boost*). Onde no primeiro, o nível de tensão na saída é menor que o da entrada, no elevador, a tensão de saída é maior do que a de entrada e no abaixador-elevador, a tensão de saída pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada, porém seu sinal será invertido.

Conversores *buck* são muito utilizados, pois apresentam baixo índice de ruído em sua saída devido ao fato do indutor e do capacitor formarem um filtro passa-baixa [7].

O conversor CC-CC abaixador foi o escolhido para o projeto de alimentação do solenoide, devido a baixa resistência das espiras do solenoide, logo, necessita-se que a tensão de saída seja menor que a sua tensão de entrada.. Este conversor apresenta alto nível de ruído em sua entrada que é ligada diretamente ao transistor de chaveamento [8]. A Figura 3 apresenta a topologia de um conversor *buck*.

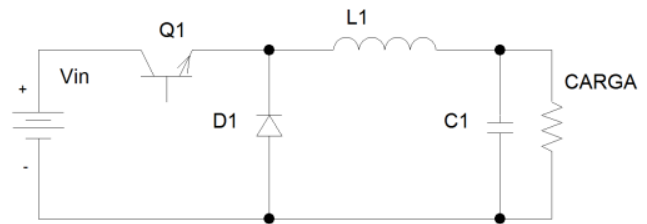


Fig.3. Topologia de conversor buck. [8]

Enquanto o transistor conduzir, o diodo é inversamente polarizado, então toda a energia da fonte é transmitida para o indutor e capacitor. No momento em que o transistor deixa de conduzir, o diodo é polarizado diretamente, descarregando o indutor e mantendo o fluxo de corrente [6].

Desprezando quedas de tensão nos componentes da topologia do conversor, a equação que descreve o seu funcionamento é escrita como:

$$V_o = D \cdot V_i [V] \quad (19)$$

Onde:

$V_o \rightarrow$ Tensão de saída
 $V_i \rightarrow$ Tensão de entrada
 $D \rightarrow$ Razão cíclica

A topologia deste conversor permite a limitação de corrente, pois se a chave do transistor estiver desligada, a tensão de saída se torna zero [7].

Para calcular os valores necessários de indutância e capacitância, utiliza-se respectivamente as Equações 20 e 21.

$$L \geq \frac{D_{\min}(1 - D_{\min})V_{i\max}}{2 \cdot f_c \cdot I_{o\min}} [H] \quad (20)$$

$$C \geq \frac{D_{\min}(1 - D_{\min})V_{i\max}}{8 \cdot L \cdot \Delta V_c \cdot f_c^2} [F] \quad (21)$$

Os valores de razão cíclica mínima e máxima são explicitadas nas Equações 22 e 23, respectivamente.

$$D_{\min} = \frac{V_o + V_{\text{direta do diodo}}}{V_{i\max} - V_{\text{mosfet}} + V_{\text{direta do diodo}}} \quad (22)$$

$$D_{\max} = \frac{V_o + V_{\text{direta do diodo}}}{V_{i\min} - V_{\text{mosfet}} + V_{\text{direta do diodo}}} \quad (23)$$

Onde,

$L \rightarrow$ Indutância
 $C \rightarrow$ Capacitância
 $I_{o\min} \rightarrow$ Corrente mínima de saída
 $D_{\min} \rightarrow$ Razão cíclica mínima
 $V_{i\max} \rightarrow$ Tensão máxima de entrada do conversor
 $f_c \rightarrow$ Frequência de chaveamento
 $\Delta V_c \rightarrow$ Variação de tensão no capacitor

B. Circuito Snubber

O circuito *Snubber* é ligado em paralelo ao chaveamento e composto por um resistor ligado em série com um capacitor. Seu propósito é diminuir oscilações e também evitar picos de tensão indesejados, causadas por variações de corrente [7]. Estas oscilações de tensão podem danificar os componentes do conversor, logo, devem ser evitadas.

A Figura 4 apresenta em detalhe o circuito *Snubber* integrado ao conversor *buck*.

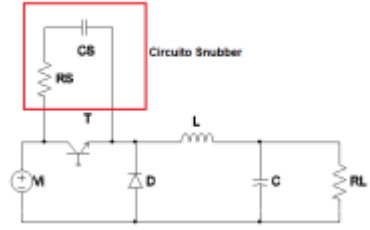


Fig.4. Circuito *snubber* ligado ao conversor *buck* [9].

Os componentes do circuito *snubber* são dimensionados através das Equações 24 e 25 [9].

$$R_s \leq \frac{V_i}{I_{o\max}} [\Omega] \quad (24)$$

$$C_s \geq \frac{1}{V_i^2 \cdot f_c} [F] \quad (25)$$

Onde,

$I_{o\max} \rightarrow$ Corrente máxima de saída
 $R_s \rightarrow$ Resistência do *snubber*
 $C_s \rightarrow$ Capacitância do *snubber*

C. Retificador de Onda Completa

Uma ponte retificadora é um tipo de circuito utilizado para retificar um sinal alternado, ou seja, transformar um sinal ondulatório em um sinal retilíneo, convertendo assim um sinal alternado (CA) para um contínuo (CC), deste modo, torna-se possível a utilização de uma fonte alternada para realizar a operação de um sistema que necessite de corrente contínua [10]. A topologia de um retificador de onda completa é apresentada na Figura 5.

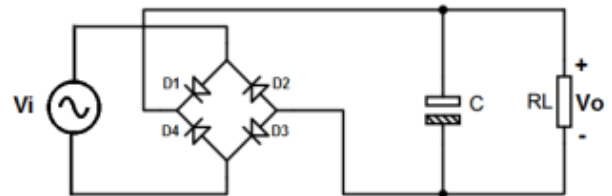


Fig.5. Topologia de um retificador [7]

O funcionamento de uma ponte retificadora ocorre basicamente em duas etapas, os semiciclos positivo e negativo. Durante o semiciclo positivo, os diodos D1 e D3 são diretamente polarizados, enquanto D2 e D4 ficam inversamente polarizados, logo, não há fluxo de energia. Durante o semiciclo negativo, o inverso ocorre, logo D1 e D3 são polarizados inversamente, enquanto D2 e D4 são polarizados diretamente permitindo o fluxo de corrente elétrica [11]

A utilização de um filtro capacitivo é necessária, pois mesmo com a retificação, ainda é possível notar características ondulatórias. Logo, para eliminar tal ondulação, o filtro capacitivo é satisfatório, pois aumenta seu valor médio em relação à carga resistiva.

Mesmo após a utilização do filtro capacitivo, ainda ocorre uma pequena ondulação na tensão de saída, chamada de tensão de *ripple*, que aumenta proporcionalmente com a corrente de saída.

O resistor no final do circuito retificador representa a carga do circuito, definida através de projeto. A frequência antes da retificação é a frequência da rede igual a 60 Hz.

O valor da capacitância do filtro é dado pela Equação 26.

$$C = \frac{V_o}{\Delta V_c \cdot f_{ret} \cdot R} [F] \quad (26)$$

Onde, f_{ret} é a frequência após a retificação, dada por:

$$f_{ret} = 2 \cdot f_{rede} \quad (27)$$

E V_o é a tensão de saída do retificador, dada por:

$$V_o = V_i \sqrt{2} \quad (28)$$

D. Gerador de Sinal PWM

A modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) realiza a comparação entre sinais de tensão de alta frequência e baixa frequência, sendo a primeira a portadora e a segunda é o sinal de erro [7]. Esta comparação resulta em um sinal com frequência fixa e largura de pulso variável.

No mercado são encontrados vários circuitos integrados que possibilitam a geração de um sinal PWM. Estes circuitos integrados já possuem toda a lógica embarcada, necessitando de poucos componentes externos.

O circuito integrado NE555 da *Texas Instruments* [12] é um dos circuitos mais utilizados em circuitos simples que necessitam de um sinal PWM, pois são de uso simples e didático. A Figura 6 apresenta a topologia de um NE555 e a Figura 7 apresenta a lógica embarcada deste circuito. Este circuito integrado necessita apenas de um capacitor escolhido por conveniência e dois resistores dimensionados a partir dos valores do capacitor e da razão cíclica. As Equações 29 e 30 apresentam como dimensionar os resistores.

$$R_1 = \frac{144 \times D}{f \times C} \quad (29)$$

$$R_2 = \frac{144 \times (1 - D)}{f \times C} \quad (30)$$

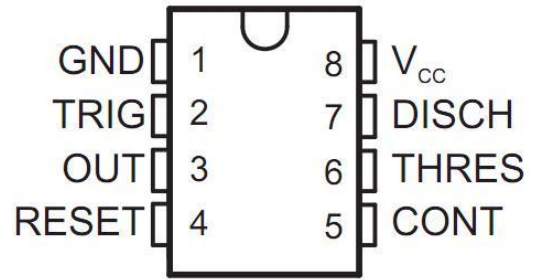


Fig.6 Topologia do NE555. [12]

A pinagem do NE555 é fornecida pela *Texas Instruments* [12].

- 1 → Aterramento
- 2 → Disparo
- 3 → Saída
- 4 → Reset
- 5 → Controle de tensão
- 6 → Limiar
- 7 → Descarga
- 8 → Alimentação V_{CC}

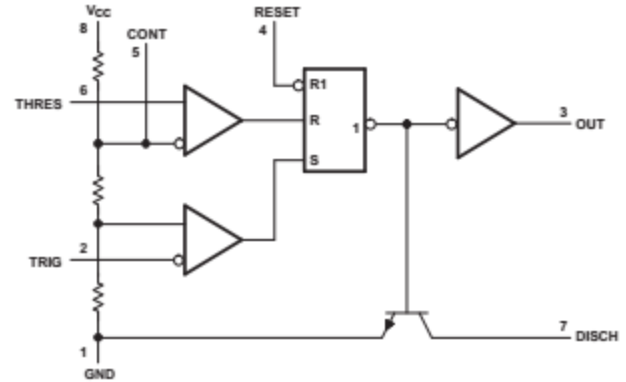


Fig.7. Lógica embarcada do NE555. [12]

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos referente ao projeto da fonte CC que será ligado ao solenoide com o objetivo de gerar um campo magnético que possa ser variado.

Primeiramente, o projeto do solenoide foi desenvolvido, visando a melhor relação entre tamanho e corrente máxima que pode ser conduzida, pois tais características influenciam diretamente no campo magnético que pode ser gerado.

Em seguida, foram elaborados o conversor *buck*, a ponte retificadora de onda completa que é ligada à rede e o gerador de sinal PWM, para que integrados, estes circuitos possam fornecer os valores de tensão necessários para que possa ser gerada a corrente elétrica que irá percorrer o solenoide. Através dos cálculos apresentados e considerações referentes ao melhor aproveitamento do material e relação custo/benefício, foram elaborados os componentes que devem integrar e atender as especificações dos circuitos.

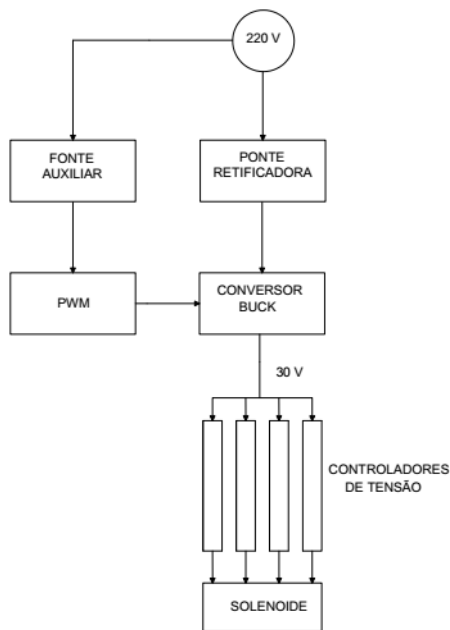


Fig.8. Diagrama de blocos do projeto.

A. Dimensionamento do Condutor de Acordo com o Valor da Corrente

Para o dimensionamento do condutor que deve ser utilizado para conduzir a corrente contínua com o intuito de gerar o campo magnético do solenoide utiliza-se a tabela de condutores padrão AWG [13].

A Figura 9 mostra o gráfico que apresenta a relação entre o tamanho do diâmetro dos condutores e quais suas capacidades de condução máxima de corrente elétrica. Por meio deste gráfico, torna-se possível analisar qual corrente deve ser obtida para percorrer o solenoide. Como o número de espiras do solenoide e a corrente influenciam diretamente no valor do campo magnético que pode ser gerado, é de grande importância determinar a relação entre espiras e capacidade de condução de corrente que melhor se adequa ao projeto desejado.

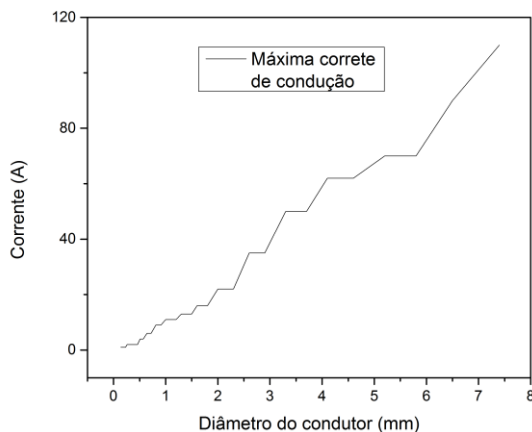


Fig.9. Relação entre o diâmetro dos condutores e suas respectivas capacidades máximas de condução de corrente.

B. Projeto do Solenoide

Após a realização da pesquisa com relação às dimensões viáveis de um solenoide, adotou-se para a realização do projeto um tubo de policloreto de vinila (PVC) por sua alta rigidez dielétrica e por possuir uma classe térmica que em regime permanente pode suportar até 70°C .

Através da análise da Figura 9, determina-se por conveniência de projeto a corrente e o diâmetro do condutor que deve conduzi-la. A corrente máxima determinada é de 50 A, corrente essa referente ao tamanho do condutor escolhido.

Através da Equação 18, foi gerada a Figura 10 que representa o gráfico que apresenta a relação entre o tamanho do solenoide e o campo magnético gerado pelo mesmo com uma corrente fixa de 50 A. Com o intuito de atender ao objetivo da construção do solenoide, foi adotado para o projeto do solenoide, um tubo com 15 cm de diâmetro.

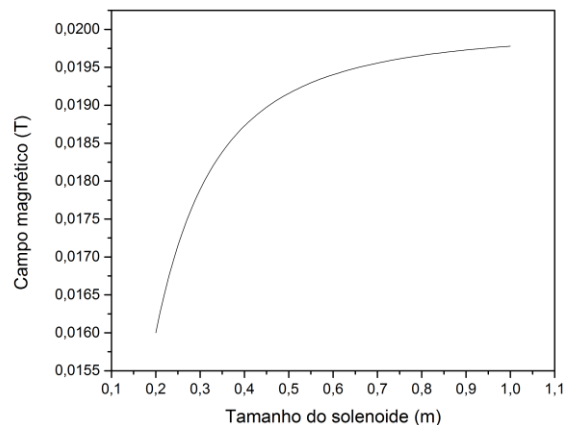


Fig.10. Tamanho solenoide/campo magnético gerado

Como pode ser observado na Figura 10, levando em consideração a relação de espiras e o comprimento do solenoide, o campo magnético gerado tende a se tornar constante, logo visando a melhor relação custo/benefício, foi adotado o tamanho do solenoide igual a 0,72 m.

Considerando a flexibilidade, capacidade máxima de condução de corrente e resistência elétrica do cabo a ser utilizado no solenoide, foi escolhido o cabo 8 AWG, com uma bitola igual a $8,4\text{ mm}^2$ e resistência igual a $0,0021\ \Omega/\text{m}$ [13]. A Tabela 1 apresenta os parâmetros calculados para a realização do projeto do solenoide.

Tabela 1. Parâmetros do solenoide

Diâmetro do tubo	150 mm
Cabo	Cabo 8 AWG
Capacidade máxima de condução	50 A
Diâmetro da Bitola	3,3 mm
Comprimento do cabo	108,63 m
Resistência do cabo	0,228123 Ω
Número de voltas do cabo	230
Altura do tubo	0,72 m
Peso/comprimento	13,340 kg/km

C. Projeto do Conversor Buck

Primeiramente, para a elaboração do projeto do conversor *buck* é necessário definir alguns parâmetros previamente. Tais parâmetros estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros prévios do projeto do conversor buck.

Parâmetro	Valor
Tensão máxima de entrada ($V_{im\acute{a}x}$)	340 V
Tensão mínima de entrada ($V_{im\grave{m}n}$)	150 V
Frequência de chaveamento (f_c)	50 kHz
Tensão de saída (V_o)	30 V $\pm$ 10%
Tensão de saturação do MOSFET (V_{mosfet})	1 V
Tensão direta do diodo ($V_{direta\ do\ diodo}$)	0,5 V
Corrente máxima de saída ($I_{om\acute{a}x}$)	50 A
Corrente mínima de saída ($I_{om\grave{m}n}$)	0,5 A

Os valores de indutância e capacitância que irão ser integrados ao conversor são calculados através das equações 20 e 21, respectivamente. As razões cíclicas mínima e máxima necessárias para o cálculo de indutância e capacitância são dadas pelas equações.

Os valores calculados para a razão cíclica mínima e máxima são respectivamente através das Equações 22 e 23 são 0,0898 e 0,2040, respectivamente.

Logo, os valores de indutância e capacitância calculados por meio das equações 20 e 21 são:

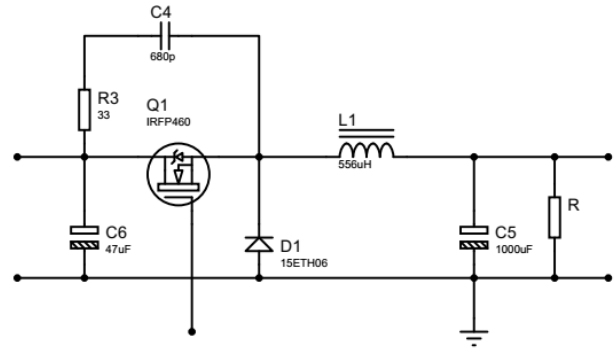
$$L \geq 555,8 \mu H$$

$$C \geq 25 \mu F$$

Adota-se uma capacitância dez vezes maior que o calculado, para que apenas a componente de tensão da resistência em série equivalente do capacitor influencie na ondulação.

O valor da capacitância adotada para o projeto é de 1000 μF por ser um valor comercial de fácil aquisição e por diminuir as oscilações na saída.

A Figura 11 apresenta a simulação do conversor *buck* simulado com o auxílio de um circuito *Snubber*.

Fig.11. Conversor *buck* com circuito *snubber*

Os valores calculados de resistência e capacitância do *Snubber* são 33 Ω e 173 pF, respectivamente. No projeto adota-se um capacitor de 680 pF.

O resistor no final do conversor funciona como pré-carga e um capacitor de 47 uF foi colocado na entrada do circuito para eliminar ruídos de tensão após a retificação. Este capacitor tem valor igual ao filtro capacitivo do retificador.

D. Projeto do Circuito Gerador de Sinal PWM

Aplicando os valores de razão cíclica obtidos no projeto do conversor *buck*, juntamente com a escolha do filtro capacitivo por conveniência igual a 100nF nas Equações 29 e 30, torna-se possível dimensionar os resistores R1 e R2 que devem integrar o circuito gerador de sinal PWM. Os resistores R1 e R2 calculados têm valores aproximados de 6 k Ω e 23 k Ω respectivamente. O circuito simulado do circuito gerador de sinal PWM está apresentado na Figura 12.

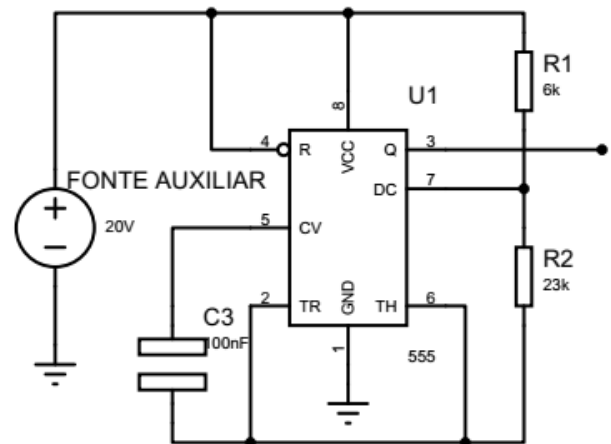


Fig.12. Circuito PWM

E. Projeto do Retificador de Onda Completa

A fonte CA da rede que deve ser retificada pela ponte é de 220 V com pico aproximado de 311 V. Desta forma, a ponte retificadora deve ser dimensionado de modo que suporte tensões superiores à de pico com o intuito de

proteger os componentes do circuito e manter seu funcionamento mesmo em caso de sobretensões. Sendo assim, a ponte retificadora é projetada para suportar 600 V.

De acordo com a Equação 26, a capacitância do filtro capacitivo que deve integrar o circuito retificador em paralelo à carga genérica escolhida é 47 μF . A Figura 13 apresenta a simulação do circuito retificador. Os diodos utilizados na simulação são do tipo 1N4007.

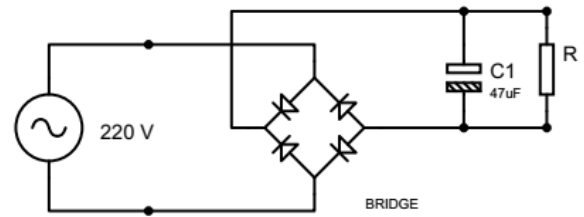


Fig.13. Circuito retificador

A medição da tensão retificada deve ser feita em paralelo ao resistor referente à carga do circuito.

Após a elaboração dos componentes da fonte, elabora-se a Figura 14 que apresenta a integração da ponte retificadora de onda completa com o conversor *buck* com seu chaveamento controlado pelo gerador de sinal PWM.

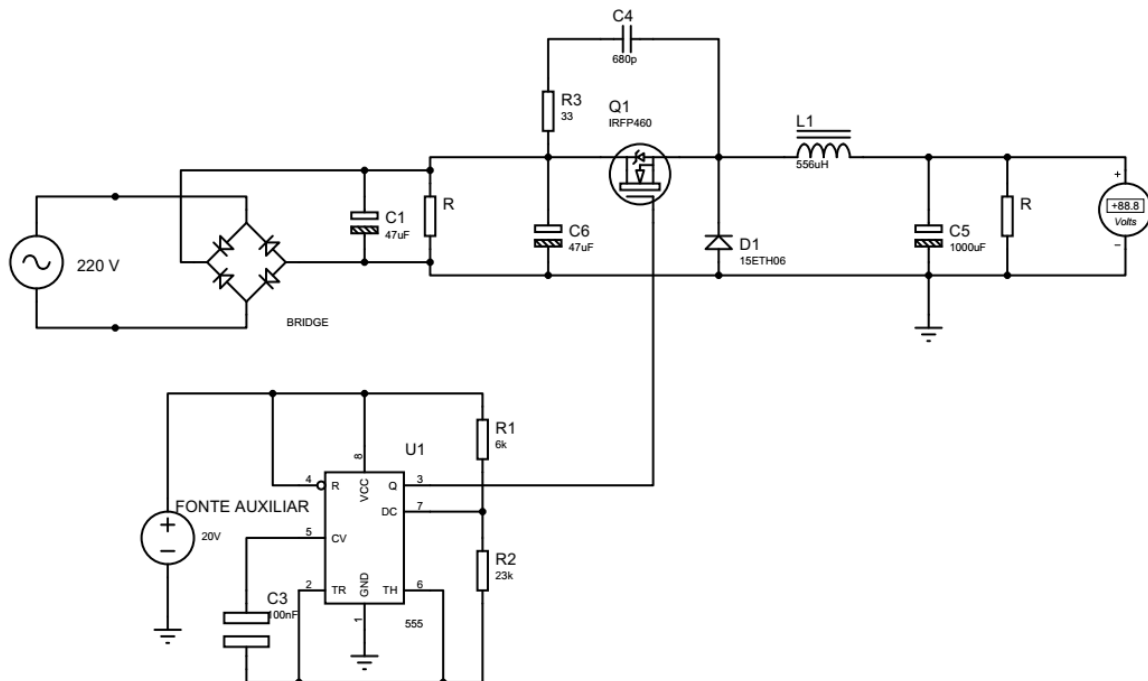


Fig.14. Circuito com todos os componentes

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi constatado na simulação que a ponte retificadora operou de forma satisfatória, apresentando estabilidade, tendo em sua saída um sinal com poucas ondulações e perdas. Aplicando uma tensão V_{ca} de 220 V na entrada, obtém-se uma tensão de saída igual a 219 V retificados. A perda de 1 V está dentro da margem de erro prevista. Tal variação pode ser atribuída à perda natural nos componentes do projeto.

Destaca-se o fato de que a ponte retificadora foi projetada de tal forma que opera com tensão de entrada de 127 Vca, sendo assim bivolt, isto denota a praticidade do circuito retificador, pois a margem de tensão que pode ser retificada é ampla, com uma faixa de operação entre 127 e 220 V, possibilitando diversas aplicações.

Após a constatação do funcionamento da ponte retificadora de onda completa, estuda-se a eficácia do conversor abaixador, que apresenta um grau de dificuldade de ajuste maior, devido ao fato de possuir mais componentes que devem operar de forma combinada e contínua.

Foi constatado na saída no conversor *buck* a tensão de 29,9 V, este valor de tensão se enquadra na margem de 10% para mais ou para menos da tensão de 30 V pré-estabelecido no projeto do conversor. Há uma pequena queda no valor da tensão que ocorre por fatores como perdas nos componentes e pequenas alterações no chaveamento do conversor. A Figura 15 apresenta em detalhe a tensão obtida na saída do conversor *buck*.

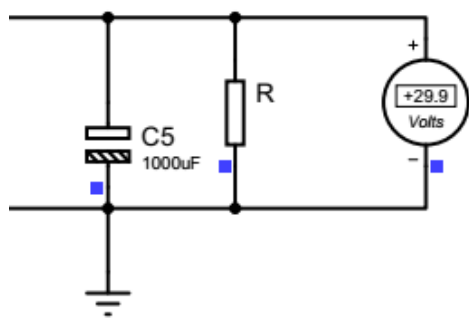


Fig.15. Tensão na saída do conversor *buck*

Completa a etapa de retificação e a diminuição do nível de tensão, se faz uso de controladores de tensão em paralelo para controlar a corrente que percorre o solenoide. A corrente máxima que o solenoide pode conduzir é de 50 A, logo, serão utilizados quatro controladores de tensão com capacidade de 15 A cada.

A tensão entregue pelos controladores de tensão ligados em paralelo deve ser de no máximo de 11,5 V, devido a resistência do solenoide ser igual a $0,2281\Omega$, deste modo a corrente que percorre o solenoide não ultrapassa a corrente máxima. Por critérios de segurança e proteção dos componentes do sistema da fonte e do solenoide, o nível de corrente máxima deve ser respeitado. Correntes superiores à corrente máxima estipulada, causam superaquecimento do material, fazendo-os entrar em colapso e combustão.

A Figura 16 mostra a relação entre a tensão entregue ao solenoide pelos controladores de tensão e a corrente que pode percorrer o solenoide levando em consideração a resistência fixa.

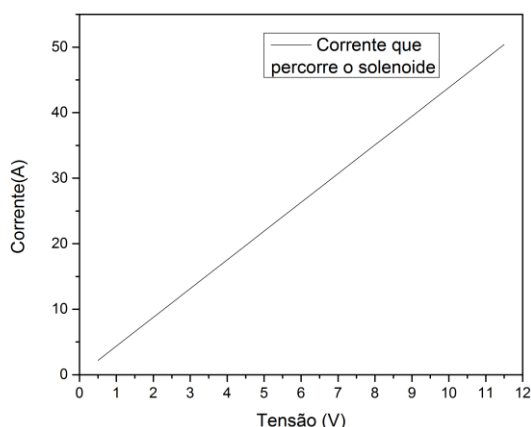


Fig.16. Relação da tensão entregue ao solenoide e a corrente produzida.

Com os possíveis valores de corrente que podem percorrer o solenoide dependendo da configuração dos controladores de tensão, gera-se a Figura 17 que apresenta o gráfico que mostra os valores de campo magnético que podem ser gerados ao variar o valor da corrente. Os valores

utilizados para os cálculos foram obtidos através da simulação.

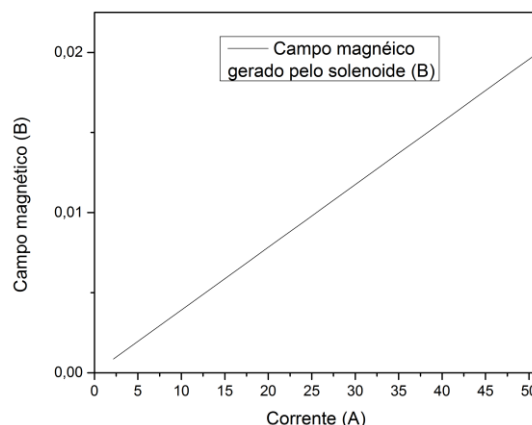


Fig.17. Valores de campo magnético que podem ser produzidos (T)

Para fins de comparação com outros estudos, gerou-se a Figura 18, que apresenta o gráfico com a mesma relação da Figura 16 com os valores magnéticos dados em Gauss ao invés de Tesla. 1 Gauss (G) é igual a 10^{-4} Tesla (T).

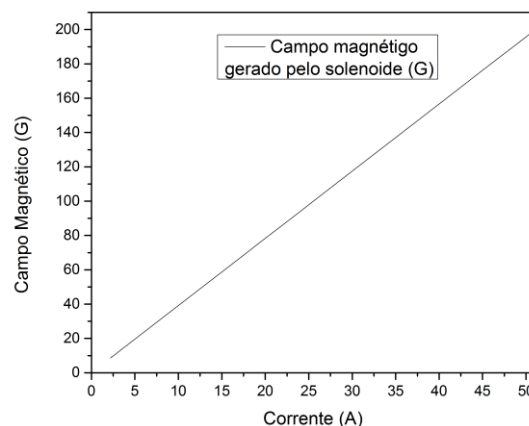


Fig.18. Valores de campo magnético que podem ser produzidos (G)

Nota-se pela análise das Figuras 17 e 18 que ao considerar todos os parâmetros referentes ao solenoide constantes, variando apenas a corrente, a relação entre corrente e campo gerado se torna linear. Relações lineares são de muita utilidade, pois permitem um controle das grandezas. Tal controle é benéfico ao se realizar um projeto e comparar os dados obtidos com os calculados previamente.

VI. CONCLUSÕES

Como recomendações para futuros estudos de uso de fontes contínuas para aplicações magnéticas, destaca-se a utilização de um circuito de malha fechada para otimização do chaveamento do sistema, além da análise do alcance da reprogramação que a variação de campo magnético exterior gera em parâmetros de materiais que compõem antenas semelhantes a Petosa et al. [1], [2] e Silva Neto [4].

A elaboração do solenoide, e da fonte que deve alimentar o mesmo foi bem sucedida, apresentando valores satisfatórios de tensão e corrente entregue pela fonte. O planejamento de custo e benefício se mostrou parte vital deste trabalho, pois em questão de projetos, busca-se sempre alternativas que tornem a elaboração viável e condizente ao propósito para o qual foi projetado.

Por fim, foi observado através da simulação que o projeto é viável e pode ser utilizado para aplicações magnéticas por meio da reconfiguração das propriedades de antenas, como frequência de ressonância. O projeto pode ser adaptado para escalas diferentes, dependendo do objetivo em questão e da disponibilidade de materiais e dispositivos de proteção e as devidas considerações de segurança.

REFERÊNCIAS

- [1] PETOSA, A. et al. Magnetically tunable ferrite resonator antenna. *Electronics Letters*, [s.l.], v. 30, n. 13, p.1021-1022, 23 jun. 1994. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el:19940698>.
- [2] PETOSA, A. et al. Switchable LP/CP ferrite disk resonator antenna. *Electronics Letters*, [s.l.], v. 31, n. 3, p.148-149, 2 fev. 1995. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el:19950098>.
- [3] VASCONCELOS, C. de F. L.. **Desenvolvimento de Antenas de Microfita com Patch em Anel Utilizando Materiais Ferrimagnéticos e Metamateriais**. 2010. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- [4] SILVA NETO, V. P.. **Análise e Desenvolvimento de Novas Configurações de Antenas, Filtros e Superfícies Seletivas de Frequência Não-Uniformes e Reconfiguráveis pelo Método WCIP Generalizado**. 2016. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- [5] TOGINHO FILHO, D. O.; LAURETO, E.. **Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral**. Londrina: Departamento de Física, 2010.
- [6] MARTINS, D. C.; BARBI, L.. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC básicos não isolados**. 2. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2006.
- [7] POZZATTI, E.. **PROJETO E ANÁLISE DE UMA FONTE CHAVEADA EM ALTA FREQUÊNCIA PARA LABORATÓRIO DE ENSINO COM SAÍDAS: $\pm 12\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 3,3\text{ V}$ E VARIÁVEL ATÉ 25 V** . 2015. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.
- [8] LOPES, K. S.. **Sistema de fontes reguladas/isoladas/sincronizadas para aplicação em UPS**. Programa de Mestrado em Engenharia (dissertação de mestrado) Londrina, 2012. Disponível em: <http://www.uel.br/pos/meel/disserta/2012_Kleber%20dos%20Santos%20Lopes_2009-1.pdf> Acesso em: 31 de jun. 2020
- [9] DUBILIER, C.. Application Guide: Snubber Capacitors. Cornell Dubilier Electronics, Inc, 2011. Disponível em: <<http://www.cde.com/resources/catalogs/igbtAPPguide.pdf>>. Acesso em 31 de jan. 2020
- [10] RASHID, M. H.. **Eletrônica de Potência: Circuitos, dispositivos e Aplicações**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1999.
- [11] POMÍLIO, J. A.. **Fontes Chaveadas**. Campinas: Edição do Autor, 2014.
- [12] TEXAS INSTRUMENTS. **NE555 Datasheet**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>>. Acesso em: 31 de jan. 2020
- [13] EGENERAL. **Tabela AWG**. Disponível em: <<http://www.egeneral.com.br/TabelaAWG>> Acesso: 31 de jan. 2020



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



ATA DE DEFESA DE PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

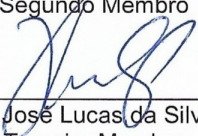
Às dez horas e trinta minutos do dia **sete de Fevereiro do ano de dois mil e vinte**, no Laboratório de Energias Renováveis, prédio Laboratório de Engenharias I da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, campus sede (Mossoró - RN), sob a presidência do Prof. Dr. Isaac Barros Tavares da Silva, reuniu-se a banca examinadora de defesa do Projeto de Engenharia Elétrica de autoria do aluno **Antonio Anderson Pereira dos Santos**, do curso de Engenharia Elétrica desta Universidade com o título **"Desenvolvimento de uma fonte contínua baseada em componentes de potência para aplicações magnéticas"**. A Banca Examinadora foi composta pelos professores Dr. Isaac Barros Tavares da Silva, presidente da banca e orientador do Projeto de Engenharia Elétrica, Eng. M. Sc. Juan Rafael Filgueira Guerra, primeiro membro e coorientador, Prof.^a M. Sc. Samanta Mesquita de Holanda, como segundo membro e Prof. Dr. José Lucas da Silva Paiva, como terceiro membro. Foram registradas as seguintes ocorrências: o aluno apresentou o trabalho e em seguida houve arguição por parte dos membros da banca. As correções e alterações textuais foram entregues ao aluno, que se comprometeu em fazê-las em sua totalidade. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada, tendo o aluno obtido às seguintes notas: 9,0 (NOVE) como primeira nota, como segunda nota 9,0 (NOVE), como terceira nota 9,0 (NOVE) e, como quarta nota 9,0 (NOVE). Apuradas as notas verificou-se que **o aluno foi APROVADO com média geral igual a 9,0 (NOVE), cumprindo as exigências para a aprovação do componente curricular Projeto de Engenharia Elétrica**. Para constar, eu, Isaac Barros Tavares da Silva, presidente da banca e orientador do Projeto de Engenharia Elétrica, lavrei a presente ata que, após lida e considerada conforme, segue assinada pelos professores membros da banca.

Mossoró, 07 de Fevereiro de 2020


Prof. Dr. Isaac Barros Tavares da Silva
Presidente


Eng. M. Sc. Juan Rafael Filgueira Guerra
Coorientador / Primeiro Membro


Prof.^a M. Sc. Samanta Mesquita de Holanda
Segundo Membro


Prof. Dr. José Lucas da Silva Paiva
Terceiro Membro