



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ALICE VIEIRA TURNELL

**ESTUDO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE RESISTORES PARA  
APLICAÇÃO EM UM GERADOR DE IMPULSOS DE TENSÃO**

Campina Grande, Paraíba  
Maio de 2014

ALICE VIEIRA TURNELL

# ESTUDO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE RESISTORES PARA APLICAÇÃO EM UM GERADOR DE IMPULSOS DE TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Maio de 2014

ALICE VIEIRA TURNELL

# ESTUDO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE RESISTORES PARA APLICAÇÃO EM UM GERADOR DE IMPULSOS DE TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Aprovado em        /        /

---

**Professor Convidado**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

---

**Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador

Dedico este trabalho a todos que contribuíram para minha formação acadêmica e, acima de tudo, pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFCG e ao LAT, que me acolheram durante a graduação e me permitiram concluir este trabalho.

À minha mãe, pela educação e valores transmitidos, e pelo apoio durante toda a graduação e sempre.

Ao meu pai, meus irmãos Carolyn, Mathew e Mariana, e também a João, Toni, e a toda minha família, que sempre me apoiou e esteve presente.

Aos meus amigos, os quais considero família. Aos amigos do 8.1, que se mantiveram unidos e se apoiaram por 7 anos. A Rafael, que esteve ao meu lado sempre.

Ao meu orientador, Professor Edson Guedes, pelo conhecimento compartilhado e por ter proposto este projeto.

Ao Professor Faustino, pela enorme disposição de ajudar e por todo o conhecimento que me passou, sem o qual não seria possível concluir este trabalho.

A Chico, Danilo e Simões, que me ajudaram ao longo do projeto. Ao professor Manassés do DEM, pela disposição de ajudar.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram e me apoiaram não apenas na realização deste trabalho, mas ao longo da graduação e da minha vida.

*"Challenges are what makes life interesting and overcoming them is what makes life meaningful."*  
Joshua J. Marine.

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo realizar o estudo de resistores para aplicações de alta tensão, mais especificamente em geradores de impulsos de alta tensão. A partir do estudo realizado, foram projetados e construídos resistores para o gerador de impulsos de alta tensão do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. A principal motivação do trabalho foi recuperar o gerador de impulsos por meio da reposição de resistores danificados, e possibilitar a rápida reposição de resistores que venham a ser danificados futuramente, utilizando os projetos e métodos descritos neste trabalho. Os métodos aqui apresentados podem ser utilizados como referência para projetos de resistores de fio, em geral. O projeto de resistores, apresentado neste relatório, adota uma adequação do método de enrolamento de Ayrton-Perry visando reduzir a indutância em resistores de fio. No texto é apresentada uma análise comparativa das principais ligas metálicas utilizadas em fios resistivos, no entanto, na escolha do material foi considerada a disponibilidade no LAT. A viabilidade do projeto foi verificada através da construção do resistor de frente de onda, utilizando equipamentos disponíveis no Departamento de Engenharia Elétrica (DEE). Foram realizados testes para medição da resistência e indutância, e para verificação das características de operação do resistor quanto à potência e temperatura, utilizando um termovisor. Estes testes permitiram demonstrar que o projeto realizado oferece resultados satisfatórios e que estes atendem às especificações do gerador de impulsos de alta tensão para o qual o resistor foi construído.

**Palavras-chave:** Resistor de fio; Gerador de impulsos de alta tensão; Fio resistivo; Ligas metálicas.

## ABSTRACT

The goal of this final year project was to study different types of resistors used in high power applications, and to design and build replacement resistors for the impulse generator of the High Voltage Laboratory (LAT) at UFCG. The blueprint for the building of all the resistors for this equipment is presented, in order to replace not only those which are currently damaged, but also those which may need to be replaced in the future. The methods used in this project can be applied to the design of wire-wound resistors in general. The resistors' design was based on Ayrton-Perry's winding method, in order to produce non-inductive wire-wound resistors. The choice of the resistive wire was made based on the comparison of the main alloys used in wire-wound resistors, and also based on the availability of these alloys in the laboratory at UFCG. The viability of the project was verified through the construction of the front resistor, using the Electrical Engineering Department's tools and equipments. Tests were conducted on the front resistor regarding its resistance, inductance, power and temperature, the latter measured using a thermal camera. The tests showed satisfactory results, which meet the specifications required by the impulse generator at LAT.

**Keywords:** Wire-wound resistor; Impulse Generator; Resistive wire; Alloys.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Resistor de composição de carbono .....	16
Figura 2. Resistor de filme de carbono .....	16
Figura 3. Resistor de 282 k $\Omega$ composto por resistores de camada de óxido metálico em série. .	17
Figura 4. Resistor de fio do gerador de tensão impulsiva do LAT- UFCG.....	18
Figura 5. Formas de onda de impulsos de tensão (a) atmosféricos e (b) de manobra.....	19
Figura 6. Circuitos para a geração de tensão impulsiva tipos (a) "a" e (b) "b".....	21
Figura 7. Gerador de Marx com 3 estágios .....	23
Figura 8. Efeito da indutância do circuito na forma de onda do impulso.....	25
Figura 9. Métodos de enrolamento para resistores de fio: (a) Comum, (b) Bifilar e (c) Ayrton-Perry adaptado para um tubo cilíndrico. ....	27
Figura 10. Passo e diâmetro para o enrolamento do fio resistivo no núcleo. ....	31
Figura 11. Etiqueta informativa de uma liga Nikrothal presente no LAT.....	36
Figura 12. Arranjo para o enrolamento do resistor com o torno do DEE.....	41
Figura 13. Medição do valor da resistência para o resistor de frente. ....	43
Figura 14. Não uniformidade do passo obtido, utilizando o torno do DEE. ....	44
Figura 15. Medição da indutância do resistor de frente. ....	44
Figura 16. Verificação da operação do resistor de frente.....	45
Figura 17. Medição da temperatura com o termovisor, quando aplicada uma tensão de 50 V sobre o resistor de frente. ....	46
Figura 18. Curva da potência versus temperatura no resistor de frente. ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades das principais ligas metálicas utilizadas em fios resistivos .....	29
Tabela 2. Dados dos resistores do gerador de altas tensões impulsivas do LAT.....	30
Tabela 3. Dados utilizados para o projeto dos resistores do gerador do LAT .....	34
Tabela 4. Ligas disponíveis no LAT.....	36
Tabela 5. Projeto do Resistor de Frente. ....	37
Tabela 6. Projeto do Resistor de Cauda. ....	38
Tabela 7. Projeto do Resistor de Carga. ....	39
Tabela 8. Projeto do Resistor de Medição.....	39
Tabela 9. Projeto do Resistor de Saída da Fonte. ....	40
Tabela 10. Tensão, corrente e temperatura medidos sobre o resistor de frente .....	45

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	12
2	Fundamentação teórica.....	14
2.1	Resistores utilizados na alta tensão .....	14
2.1.1	Resistores de Água .....	14
2.1.2	Associação em Série de Resistores .....	15
2.1.3	Resistores de fio .....	18
2.2	Gerador de Alta Tensão Impulsiva .....	18
2.2.1	Características das formas de onda de impulsos de tensão.....	19
2.2.2	Princípio de Funcionamento do Gerador de Tensões Impulsivas .....	20
2.2.2.1	Circuitos básicos para a geração de tensões impulsivas.....	20
2.2.2.2	Circuito Multiplicador de Marx.....	23
2.3	Resistores para geradores de Altas Tensões impulsivas .....	25
2.3.1	Seleção do tipo de resistor.....	25
2.3.2	Considerações sobre a indutância em resistores de fio .....	26
3	Projeto dos Resistores .....	28
3.1	Aspectos construtivos de resistores de fio.....	28
3.1.1	Núcleo do Resistor.....	28
3.1.2	Verniz Isolante .....	28
3.1.3	Fio Resistivo .....	29
3.2	Resistores a serem projetados - Gerador do LAT .....	30
3.3	Análise matemática.....	30
3.4	Projeto dos resistores .....	34
3.4.1	Considerações sobre materiais e métodos utilizados .....	34
3.4.2	Projeto dos resistores .....	37
4	Construção dos resistores .....	41
5	Testes para a validação do projeto .....	43
5.1	Medição da Resistência.....	43
5.2	Medição da Indutância .....	44
5.3	Verificação das características de operação.....	45
6	Conclusão.....	47
	Referências Bibliográficas .....	49
	APÊNDICE – Projetos Alternativos.....	50
	ANEXO A– Tabela de Conversão Gauge/B&S .....	52
	ANEXO B– Tabela de Passos do torno do DEE .....	53

# 1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica estão sujeitos a sobretensões geradas por descargas atmosféricas, além de sobretensões relacionadas a chaveamentos no sistema de potência. Tais equipamentos elétricos possuem níveis de isolamento padronizados, que são função de sua tensão nominal de operação.

Ensaio que utilizam impulsos de tensão são frequentes em laboratórios de alta tensão para a verificação do nível de isolamento elétrico de equipamentos de alta tensão e para a pesquisa e desenvolvimento de materiais isolantes e equipamentos elétricos; além de contribuir para o estudo de fenômenos associados a altas tensões. Para testar equipamentos quanto a sobretensões geradas por descargas atmosféricas que atingem o sistema e sobretensões causadas por operações de manobra no sistema, é necessário gerar formas de onda em laboratório capazes de submeter o equipamento, sob ensaio, a um esforço semelhante ao provocado por uma descarga atmosférica ou por operação de manobra.

Resistores de alta tensão são utilizados em diversas aplicações, dentre as quais em geradores de impulsos de tensão e corrente. Para a obtenção de impulsos de tensão dentro de padrões definidos pelas normas da ABNT é necessário utilizar uma combinação de parâmetros resistivos e capacitivos específicos no gerador. Portanto, as características dos resistores utilizados no gerador de impulsos de tensão são fundamentais para a obtenção das formas de onda desejadas.

Cada aplicação requer um resistor com características e métodos de fabricação específicos. Em geral, resistores para alta tensão com as especificações desejadas não se encontram prontamente disponíveis no mercado, portanto, há a opção de comprar o produto cujas especificações mais se aproximem das desejadas ou encomendar sua fabricação. Se por um lado, encomendar a fabricação do produto torna-se consideravelmente mais oneroso, por outro, a compra de um resistor que já se encontra no mercado, porém que não atende às especificações desejadas, poderá comprometer a sua aplicação. Neste contexto, surge a possibilidade do projeto e construção do resistor de alta tensão pelo próprio usuário.

Pelo exposto, o objetivo deste trabalho é realizar o projeto de resistores para o gerador de impulsos de tensão do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG, visando substituir os resistores que estão danificados que futuramente venham a ser danificados. O projeto consiste na análise das especificações dos diferentes resistores presentes no gerador, de acordo com sua função no circuito. Neste trabalho são estudados os métodos construtivos existentes e é realizada uma análise comparativa dos materiais que podem ser empregados na construção dos resistores, em especial da liga metálica utilizada no fio resistivo. As limitações da construção do resistor utilizando as facilidades da UFCG são apontadas, assim como as adequações necessárias ao projeto. As etapas para a construção dos resistores são detalhadas e testes são realizados para validar o projeto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No decorrer deste capítulo serão apresentados os principais tipos de resistores utilizados na alta tensão, o princípio de funcionamento de geradores de tensão impulsiva e serão tecidas considerações sobre resistores utilizados em geradores de impulsos de alta tensão.

### 2.1 RESISTORES UTILIZADOS NA ALTA TENSÃO

Os equipamentos utilizados nos laboratórios de alta tensão, e suas dimensões, são determinados principalmente pela magnitude da tensão aplicada sobre eles e pela sua função na aplicação. No dimensionamento destes equipamentos as perdas operacionais devem ser consideradas para evitar sobreaquecimento (KIND, et al., 1999).

Em geral, os resistores utilizados na alta tensão são classificados em: resistores de carga, descarga, amortecimento ou medição. De acordo com a sua função, eles possuirão características diferentes quanto à precisão e à capacidade de carga térmica, por exemplo. Atualmente existem diversas técnicas para a construção de resistores, que produzem resistores com propriedades diferentes, permitindo satisfazer uma maior gama de aplicações.

Dentre os tipos construtivos de resistores para alta tensão, destacam-se os resistores de água, fio e associações em série de resistores de filme de carbono, filme metálico, filme óxido metálico e camada de óxido metálico (DONOVAN, 2010). As características dos resistores serão discutidas no tópico a seguir.

#### 2.1.1 RESISTORES DE ÁGUA

Resistores líquidos são aqueles nos quais o elemento resistivo é um líquido. São utilizados em aplicações que requerem grande dissipação de potência. Dentre os resistores líquidos destacam-se os resistores de água. Eles consistem de um tubo cilíndrico feito de material isolante que contém eletrodos em cada extremidade o qual é preenchido com água destilada. Os eletrodos devem ser feitos de materiais que não enferrujem, tais como aço inoxidável e grafite (KIND, et al., 1999 p. 131). O valor da

resistência em resistores de água será função do diâmetro e do comprimento do cilindro e, pode ser ajustado para o valor desejado por meio do acréscimo de aditivos à água. Cloreto de Sódio (NaCl) e Sulfato de Cobre ( $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ) são exemplos de aditivos comumente utilizados.

Caso seja utilizada água não destilada, o valor da resistência específica obtido será menor. Isto ocorre devido à presença de íons na água da torneira, resultando em uma maior condutividade quando comparada à água destilada. A água destilada é considerada um fraco condutor de elétrons por apresentar um número desprezível de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$ . Para reduzir a resistência do resistor de água, devem-se acrescentar íons. Com o acréscimo de NaCl ao sistema, a água dissolverá o sal e dissociará sua molécula (solvatação), formando os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , reduzindo assim a resistência.

A estabilidade de um resistor é a variação de seu valor ôhmico, ao longo do tempo e em condições de estocagem ou de funcionamento, devido a fatores elétricos, térmicos ou mecânicos (VISHAY BEYSCHLAG, 2008). Uma desvantagem dos resistores de água é a instabilidade do valor da resistência, pois em geral o valor da resistência varia  $\pm 10\%$  ou mais ao longo do tempo. Portanto, tais resistores são utilizados em aplicações nas quais a precisão da resistência não é um fator crítico, por exemplo, para limitar a corrente de um circuito.

### 2.1.2 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DE RESISTORES

Uma técnica para a construção de um resistor com elevada resistência é a conexão em série de vários resistores, com resistência e potência menores. A associação equivale a um divisor resistivo com degraus de tensão relativamente pequenos quando comparados à tensão total sobre o resistor.

Os resistores em série devem ser conectados de modo a obter uma distribuição uniforme de tensão. Para uma melhor dissipação de calor, os resistores podem ser imersos em óleo.

Segue uma discussão acerca dos vários tipos de resistores utilizados em associações em série, e suas características.

Em resistores de composição de carbono, apresentado na Figura 1, o elemento resistivo consiste de um cilindro sólido feito da mistura de carbono em pó com um isolante, em geral cerâmica, e de uma resina para unir a mistura. Nestes resistores, o corpo inteiro do resistor atua como elemento resistivo e a resistência é obtida em função

da proporção de carbono na mistura. Quanto maior a quantidade de carbono presente na mistura, menor será o valor da resistência obtido.

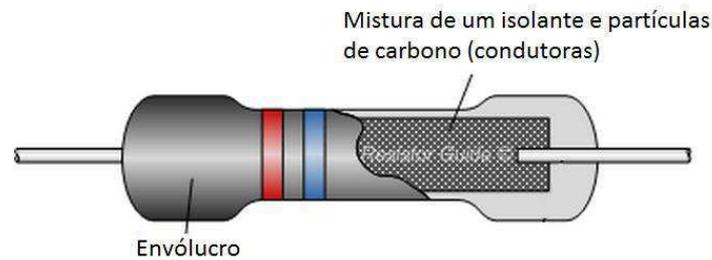


Figura 1. Resistor de composição de carbono. Adaptado de (Resistor Guide, 2014).

Os resistores de composição de carbono foram amplamente utilizados na década de 60, porém foram substituídos na maioria das aplicações por resistores de filme, uma vez que estes possuem melhores propriedades, tais como melhor tolerância obtida no processo de fabricação, e melhor dependência da resistência com a tensão. Resistores de composição de carbono ainda estão disponíveis no mercado, porém são mais caros que os resistores de filme e possuem baixa estabilidade do valor de resistência. São recomendados apenas para aplicações nas quais não sejam submetidos a sobretensões ou sobreaquecimentos.

Resistores de filme consistem de uma camada de filme depositada em um substrato isolante. A camada pode ser de filme de carbono, metálico ou óxido metálico e o substrato isolante consiste em geral de um tubo cerâmico ou de vidro. O valor da resistência é obtido a partir da formação de um sulco no filme para produzir uma fita espiralada, cuja largura e espessura definirão o valor da resistência. Os resistores de filme metálico possuem maior precisão quando comparados aos de filme de carbono (MULLER, 2009). Na Figura 2 é mostrado o aspecto construtivo de um resistor de filme de carbono.

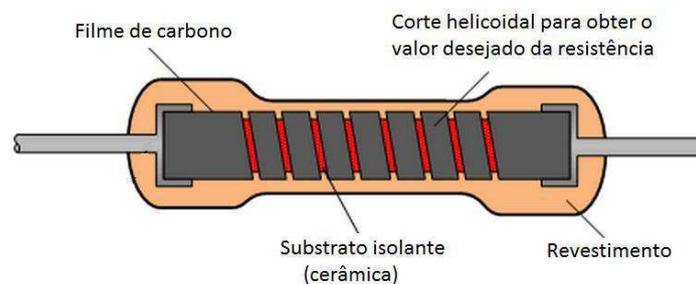


Figura 2. Resistor de filme de carbono. Adaptado de (Resistor Guide, 2014).

Uma desvantagem de resistores dos tipos filme e composto é a estabilidade obtida, pois o valor da resistência aumenta consideravelmente com o estresse frequente, decorrente de mudanças bruscas de tensão.

Uma das características dos resistores é o coeficiente de temperatura, que corresponde à mudança no valor da resistência em um dado intervalo de temperatura. Resistores de filme de carbono possuem alto coeficiente de temperatura e uma forte dependência da resistência em relação à tensão, quando em operação contínua. Já os resistores de filme metálico e de filme de óxido metálico possuem melhor coeficiente de temperatura, porém não são adequados para o uso em circuitos de alta tensão, devido à pequena espessura da camada de filme, a qual pode ser destruída durante uma variação brusca de tensão.

O tipo de resistor mais indicado para a aplicação em circuitos de alta tensão é o de camada de óxido metálico, pois possui um coeficiente de temperatura ajustável e a dependência da resistência com a tensão é limitada. São utilizados em aplicações nas quais é necessária boa estabilidade sob elevadas temperaturas. A dependência da resistência em relação à tensão pode ser reduzida para níveis desprezíveis, se o resistor for pré-estressado, por exemplo, com uma série de impulsos de tensão (KIND, et al., 1999 p. 132).

Um exemplo de uma associação em série de resistores pode ser visto na Figura 3. Trata-se de um resistor de 282 k $\Omega$ , construído para o kit de alta tensão do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG, a partir de uma associação em série de resistores de camada de óxido metálico.



Figura 3. Resistor de 282 k $\Omega$  composto por resistores de camada de óxido metálico em série.

### 2.1.3 RESISTORES DE FIO

Resistores de fio (*wire-wound resistors*) são formados por um tubo cerâmico, ou de fibra de vidro, no qual um fio condutor de alta resistividade é enrolado. O valor da resistência será função do comprimento, do diâmetro e da resistividade do fio utilizado. Na Figura 4 mostra-se um resistor de fio, do gerador de tensão impulsiva do LAT - UFCG, na qual se pode observar o fio resistivo.



Figura 4. Resistor de fio do gerador de tensão impulsiva do LAT- UFCG.

No projeto de resistores para alta tensão, utilizam-se fios resistivos feitos de ligas metálicas. Dentre as ligas utilizadas destacam-se Constantan e Nikrothal, correspondentes a ligas de cobre e níquel e, de cromo e níquel, respectivamente (KIND, et al., 1999 p. 132). No projeto dos resistores deseja-se uma liga com elevada resistividade e com o menor coeficiente de temperatura possível.

Resistores de fio são utilizados quando se deseja alta precisão no valor da resistência ou grande dissipação de potência, pois suportam elevadas temperaturas.

## 2.2 GERADOR DE ALTA TENSÃO IMPULSIVA

A geração de tensões impulsivas é fundamental para testes de alta tensão, pois simulam os estresses elétricos causados por sobretensões externas e internas, também conhecidas como impulsos atmosféricos e de manobra, respectivamente. Tensões impulsivas também são utilizadas no estudo dos mecanismos de descarga (KIND, et al., 1999 p. 42).

Visando uma melhor compreensão das funções e características de seus resistores, as características de geradores de altas tensões impulsivas serão apresentadas, assim como o seu princípio de funcionamento básico.

### 2.2.1 CARACTERÍSTICAS DAS FORMAS DE ONDA DE IMPULSOS DE TENSÃO

Impulsos de tensão atmosféricos são utilizados para simular sobretensões que surgem quando descargas atmosféricas atingem o sistema, enquanto impulsos de tensão de manobra são utilizados para simular sobretensões causadas por operações de manobra no sistema.

A amplitude da tensão gerada por descargas atmosféricas que atingem o sistema é da ordem de 1000 kV ou mais, e cada descarga pode injetar correntes de cerca de 100 kA ou de maior amplitude, nas linhas de transmissão. A amplitude de sobretensões causadas por operações de manobra está relacionada à tensão de operação e sua forma de onda é influenciada pelas impedâncias do sistema e pelas condições de manobra (KUFFEL, et al., 2000 p. 49).

Para a realização de testes em alta tensão, as formas de onda do impulso de tensão atmosférico e do impulso de tensão de manobra foram padronizadas. Na Figura 5 são mostradas as formas de onda destes dois tipos de impulsos de tensão.

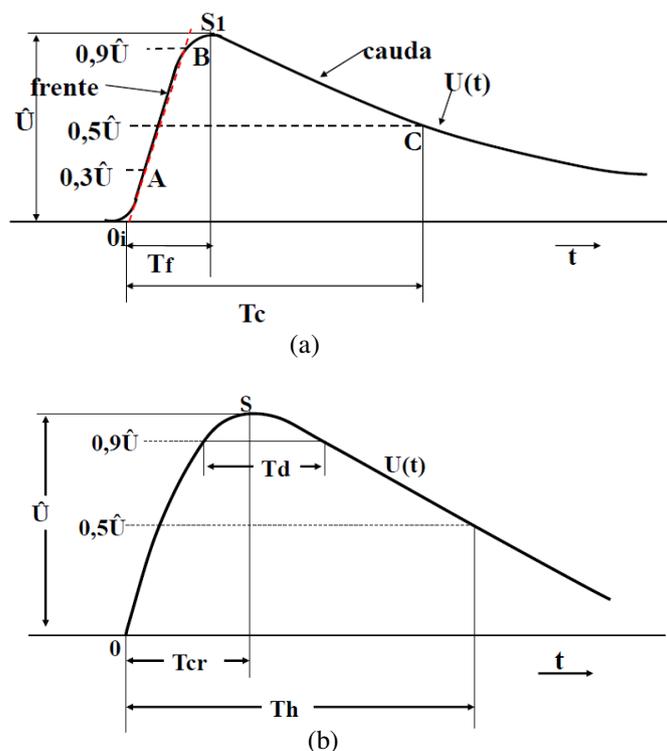


Figura 5. Formas de onda de impulsos de tensão (a) atmosféricos e (b) de manobra (LIRA, 2014).

Na forma de onda do impulso de tensão atmosférico, observada na Figura 5a, os tempos  $T_f$  e  $T_c$  correspondem aos tempos de frente e de cauda do impulso, respectivamente. Conforme a norma brasileira NBR 6936 - Técnicas de ensaio de alta tensão, o impulso atmosférico padrão tem a duração de  $1,2/50 \mu s$ . O tempo de frente deste impulso é de  $1,2 \mu s$ , com uma tolerância de  $\pm 30\%$  e, o tempo de cauda é de  $50 \mu s$ , com uma tolerância de  $\pm 20\%$ .

O tempo de cauda corresponde ao tempo no qual a amplitude da tensão na cauda do impulso corresponde a 50% do valor de pico, enquanto o tempo de frente corresponde ao intervalo de tempo necessário para o impulso atingir seu valor de pico. Para a determinação destes tempos, é necessário encontrar a origem virtual " $O_i$ " do impulso de tensão, definida como sendo o ponto no qual a linha AB intercepta o eixo do tempo. Os pontos A e B correspondem aos pontos nos quais a amplitude de tensão do impulso é igual a 30% e 90% do valor de pico, respectivamente (KUFFEL, et al., 2000 p. 50).

Na Figura 5b, observa-se a forma de onda de impulsos de tensão de manobra, na qual  $T_{cr}$  é o tempo de crista,  $T_h$  é o tempo de cauda e  $T_d$  corresponde ao tempo de duração do pico, durante o qual a amplitude da tensão é superior a 90% do valor de pico. Para impulsos de manobra, a norma NBR 6936 determina o padrão  $250/2500 \mu s$ . Assim, o tempo de crista é de  $250 \mu s$  com uma tolerância de  $\pm 20\%$ , e o tempo de cauda é de  $2500 \mu s$  com uma tolerância de  $\pm 60\%$ .

## 2.2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE TENSÕES IMPULSIVAS

Nesta seção será abordado o circuito básico para a geração de tensões impulsivas, assim como o circuito multiplicador proposto por Marx (KIND, et al., 1999 p. 46). O princípio de funcionamento dos circuitos será apresentado para a compreensão da função dos diferentes resistores, possibilitando assim sua especificação.

### 2.2.2.1 CIRCUITOS BÁSICOS PARA A GERAÇÃO DE TENSÕES IMPULSIVAS

Existem dois circuitos básicos para a geração de altas tensões impulsivas, os circuitos tipo "a" e tipo "b", os quais são ilustrados na Figura 6.

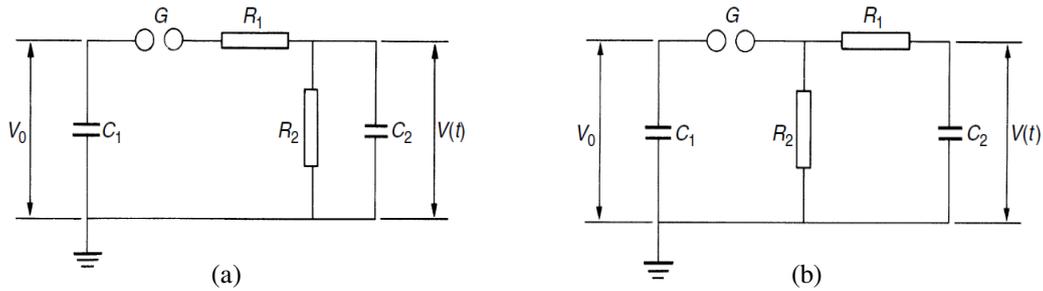


Figura 6. Circuitos para a geração de tensão impulsiva tipos (a) "a" e (b) "b" (KUFFEL, et al., 2000 p. 53).

A diferença entre os circuitos apresentados é a posição do resistor de cauda  $R_2$  em relação ao resistor de frente  $R_1$ , fazendo com que o circuito do tipo "b" possua maior rendimento e por isto seja o arranjo básico mais utilizado para gerar tensões impulsivas (KIND, et al., 1999 p. 49). O gerador de impulsos de tensão do LAT baseia-se no circuito tipo "b" e, portanto, será o circuito abordado.

O princípio básico do gerador de tensão impulsiva consiste no carregamento do capacitor de impulso  $C_1$  por meio de uma resistência de carga elevada até que seja atingida uma tensão contínua  $V_0$ , para em seguida, descarregá-lo a partir da ignição do centelhador G. Logo após a ignição, a tensão de impulso desejada  $V(t)$  aparecerá nos terminais do capacitor de carga  $C_2$ .

A forma de onda do impulso obtido é função dos valores dos parâmetros do circuito. As resistências e capacitâncias do circuito definirão as constantes de tempo do carregamento e descarregamento dos capacitores e, conseqüentemente, definirão a forma de onda do impulso gerado. Quanto maior a constante de tempo de um circuito RC, dada pela multiplicação da capacitância com a da resistência do circuito, maior será o tempo necessário para o capacitor carregar até a tensão de pico ou descarregar a partir desta.

No momento da ignição,  $R_1$  e  $C_2$  serão postos em série. Para obter uma forma de onda do impulso com um tempo de frente curto, deve-se carregar rapidamente o capacitor  $C_2$  até um valor próximo do valor de pico da tensão de carregamento. Para tal, atribui-se para o carregamento de  $C_2$ , uma constante de tempo pequena dada por  $R_1C_2$ . Para satisfazer estas condições de carregamento e descarregamento, deve-se atribuir:

$$R_2 \gg R_1. \quad (1)$$

Uma vez que o rendimento do circuito tipo "b" é dado por (KIND, et al., 1999 p. 46):

$$\eta \leq \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (2)$$

Para obter o maior rendimento possível, deve-se atribuir:

$$C_1 \gg C_2. \quad (3)$$

A curva do impulso de tensão é dada matematicamente pela expressão:

$$v(t) = \frac{V_0}{R_1 C_2} \cdot \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \left( e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (4)$$

na qual se observa a diferença de duas funções exponenciais decrescentes com constantes de tempo  $\tau_1$  e  $\tau_2$ . A subtração das exponenciais resulta em uma função exponencial dupla, correspondente à forma de onda do impulso de tensão.

Das Equações (1) e (3) obtém-se:

$$R_2 C_1 \gg R_1 C_2. \quad (5)$$

Para impulsos de tensão gerados a partir do circuito tipo "b" as constantes de tempo serão dadas por (KIND, et al., 1999 p. 280):

$$\tau_1 \approx R_2 (C_1 + C_2); \quad (6)$$

$$\tau_2 \approx R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (7)$$

Um parâmetro importante do gerador de impulsos é a energia do impulso, a qual será transformada durante o descarregamento do capacitor  $C_1$ . A energia é dada pela equação:

$$W = \frac{1}{2} C_s V_0^2. \quad (8)$$

### 2.2.2.2 CIRCUITO MULTIPLICADOR DE MARX

Para obter tensões impulsivas com o máximo valor de pico possível, a partir de um dado valor de tensão contínua de carregamento, utiliza-se o circuito multiplicador proposto por E. Marx em 1923, o qual está ilustrado na Figura 7, para 3 estágios.

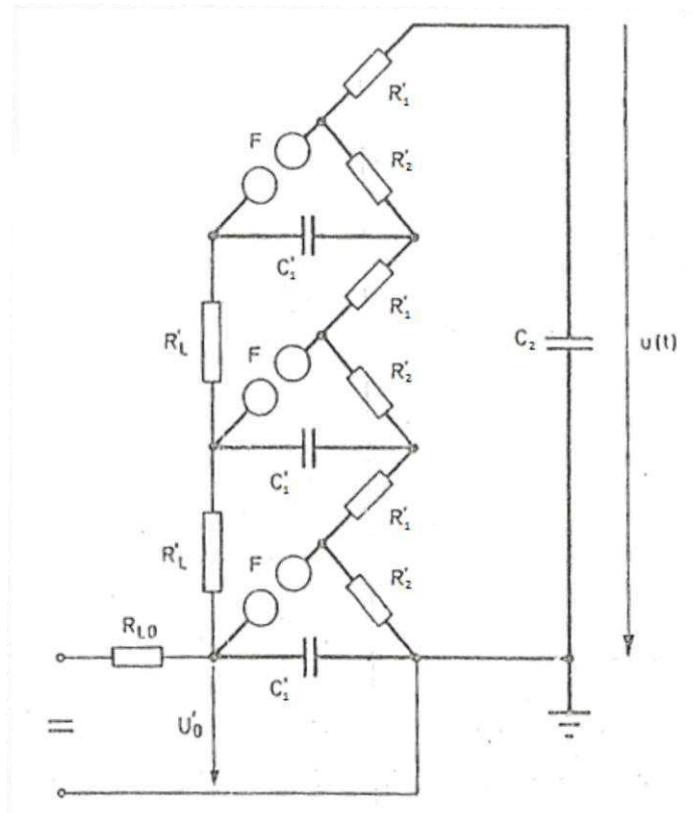


Figura 7. Gerador de Marx com 3 estágios (KIND, et al., 1999 p. 47).

O circuito multiplicador de Marx tem como circuito equivalente o circuito tipo "b", mostrado na Figura 6b, para o qual as seguintes relações são válidas (KIND, et al., 1999 p. 47):

$$V_0 = n \cdot V'_0; \quad (9)$$

$$R_1 = n \cdot R'_1; \quad (10)$$

$$R_2 = n \cdot R'_2; \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{1}{n} \cdot C'_1. \quad (12)$$

Nas equações: 9, 10, 11 e 12,  $n$  corresponde ao número de estágios.

O princípio básico do funcionamento do circuito proposto por Marx é o mesmo do circuito tipo "b". A diferença consiste no fato de no circuito de Marx, os capacitores dos vários estágios serem carregados em paralelo e descarregados em série, obtendo uma multiplicação da tensão de carregamento por um fator correspondente ao número de estágios. Considerando-se, por exemplo, que os estágios tenham sido individualmente carregados com uma tensão de 100 kV, para um gerador de impulso formado por três estágios, a tensão máxima de carregamento obtida será equivalente a 300 kV.

Inicialmente, os capacitores de impulso  $C'_1$  dos estágios são carregados em paralelo até a tensão de carregamento do estágio  $V'_0$ , por meio dos resistores de carga  $R'_L$ . Com a ignição dos centelhadores, os capacitores de impulso  $C'_1$  são ligados em série com os resistores de frente  $R'_1$ , fazendo com que o capacitor de carga  $C_2$  seja carregado por meio da conexão em série de todos os resistores de frente. Em seguida, os capacitores de impulso  $C'_1$  e o capacitor de carga  $C_2$  irão descarregar por meio dos resistores de frente e de cauda.

Em geral, para garantir que os capacitores descarreguem por meio dos resistores de frente e de cauda e, não por meio do resistor de carga, escolhe-se:

$$R'_L \gg R'_2. \quad (13)$$

A forma do impulso de tensão obtida é função das características do gerador de impulso, tais como as capacitâncias e indutâncias parasitas nos estágios, das resistências de frente e de cauda e do número de estágios. Os elementos do circuito contêm indutâncias indesejadas e o circuito do gerador ocupa um espaço físico considerável, fazendo com que mais indutâncias sejam inseridas no circuito. A presença destas indutâncias, juntamente com as capacitâncias do sistema, geram oscilações no pico da tensão do impulso, distorcendo a forma de onda esperada. O valor da indutância no circuito pode variar entre 10  $\mu$ H e centenas de microhenries (NAIDU, et al., 1995 p. 134). O efeito da variação da indutância equivalente do circuito sobre a forma de onda da frente do impulso pode ser visto na Figura 8.

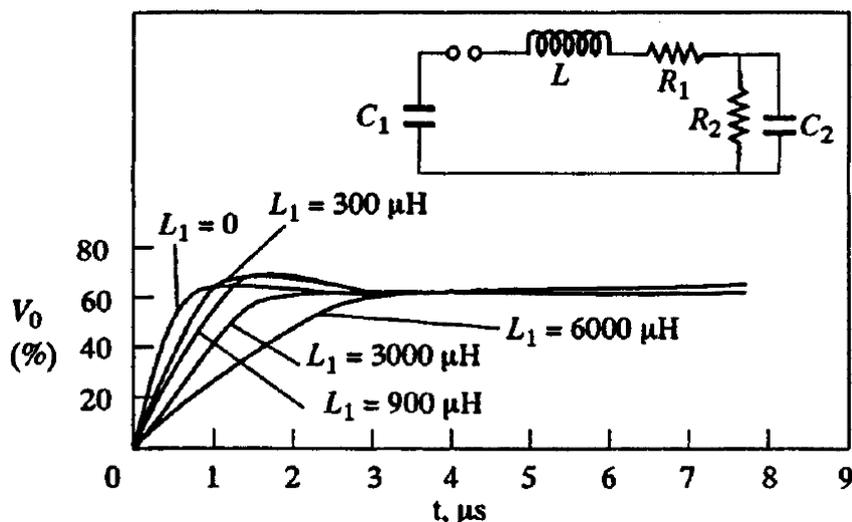


Figura 8. Efeito da indutância do circuito na forma de onda do impulso (NAIDU, et al., 1995 p. 136).

Nele, a indutância equivalente é considerada em série com o resistor de frente. Observa-se da Figura 8, que quanto maior o valor da indutância indesejada no circuito, maior será o tempo de frente e mais distorcida será a frente de onda. Uma forma de amortecer as oscilações na frente de onda consiste em aumentar a resistência de frente  $R_1$ , porém isto provoca uma redução no valor de pico da tensão.

Portanto, deseja-se que os elementos do gerador de tensão impulsiva sejam projetados de maneira a minimizar ao máximo a indutância do circuito.

## 2.3 RESISTORES PARA GERADORES DE ALTAS TENSÕES IMPULSIVAS

Algumas considerações devem ser feitas quanto a resistores que serão submetidos à impulsos de alta tensão em laboratórios. Além de selecionar o tipo mais adequado de resistor para a aplicação em geradores de altas tensões impulsivas, deve-se também optar por aspectos construtivos que reduzam ao máximo as indutâncias do circuito.

### 2.3.1 SELEÇÃO DO TIPO DE RESISTOR

Os resistores do gerador de tensão impulsiva podem ser de fio resistivo, líquidos ou de composição de carbono. Embora resistores de líquido e de composição de carbono possuam a vantagem de ter uma maior capacidade de dissipação de calor, a instabilidade

do valor de sua resistência conduz à escolha de resistores de fio para o circuito do gerador (KUFFEL, et al., 2000 p. 69).

Todos os tipos de resistores são capazes de suportar picos de tensão de curta duração acima da sua potência nominal de operação contínua. No entanto, o desempenho deles dependerá de seus aspectos construtivos. Quando submetidos a impulsos de alta energia, resistores podem ser danificados devido à incapacidade de dissipar o calor gerado. O dano pode ser uma ruptura interna que conduza à abertura do elemento resistivo, à formação de um arco ao longo do invólucro do resistor, ou ainda, à modificação do valor da resistência após a aplicação do impulso. Para aplicações que submetam resistores a impulsos, devem ser escolhidos os resistores de fio, uma vez que este é o tipo de resistor menos susceptível à degradação causada por impulsos (HORNER, 1981).

### 2.3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INDUTÂNCIA EM RESISTORES DE FIO

Conforme discutido no Item 2.2.2, deseja-se reduzir ao máximo as indutâncias no circuito, visando reduzir as oscilações na frente de onda e no pico da onda do impulso. Logo, os resistores de frente e de cauda deverão possuir a mínima indutância possível.

Para resistores de fio, o método comum de enrolar o fio resistivo é em uma única camada de enrolamento e, portanto, um único sentido de enrolamento. Este método resulta basicamente na obtenção de um indutor. Para reduzir a indutância do resistor, existem métodos de enrolamento tais como o método bifilar e o método Ayrton-Perry (Resistor Guide, 2014). Estes métodos estão ilustrados na Figura 9.

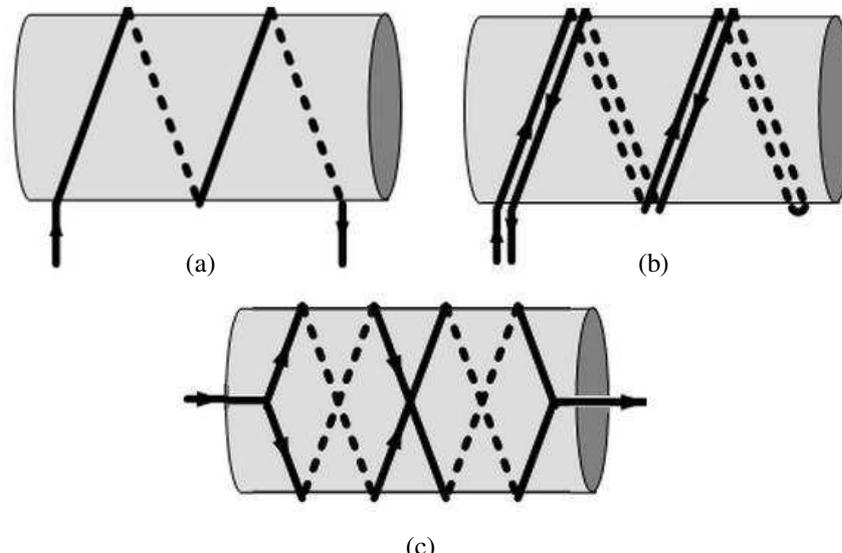


Figura 9. Métodos de enrolamento para resistores de fio: (a) Comum, (b) Bifilar e (c) Ayrton-Perry adaptado para um tubo cilíndrico. Adaptado de (Resistor Guide, 2014).

A desvantagem dos métodos bifilar e Ayrton-Perry é a dificuldade do processo de enrolamento, porém a sua aplicação é necessária para a redução da indutância. No método bifilar, apresentado na Figura 9b, obtém-se uma baixa indutância, porém a capacitância entre os fios é grande. No método de Ayrton-Perry adaptado para um tubo cilíndrico, apresentado na Figura 9c, existem duas camadas em paralelo, intercaladas, enroladas em sentidos opostos. A vantagem deste método é que além da redução da indutância do resistor, há também a redução da capacitância, uma vez que as intersecções das duas camadas estão no mesmo potencial.

## 3 PROJETO DOS RESISTORES

Neste capítulo será apresentado o projeto dos resistores de frente, cauda, carga, medição e de saída da fonte, atendendo às características necessárias para o gerador de impulsos de alta tensão do LAT. As características construtivas consideradas para o projeto são descritas, assim como a análise matemática utilizada.

### 3.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE RESISTORES DE FIO

Resistores de fio são formados por três componentes principais que definirão seu projeto, sendo estes o fio resistivo, o núcleo no qual o fio resistivo será enrolado e o verniz. Neste tópico serão abordados os componentes utilizados no processo construtivo dos resistores.

#### 3.1.1 NÚCLEO DO RESISTOR

O núcleo de resistores de fio é em geral cilíndrico e feito de um material isolante, como por exemplo, cerâmica, fibra de vidro ou plástico. Nele é enrolado o fio resistivo e, portanto, suas dimensões são fundamentais para a realização do projeto dos resistores.

#### 3.1.2 VERNIZ ISOLANTE

Uma camada de verniz é aplicada sobre o núcleo antes de realizar o enrolamento para melhor fixação do fio resistivo. Após o enrolamento do fio resistivo, outra camada de verniz isolante é aplicada para fazer o isolamento elétrico entre as espiras e também proteger o fio resistivo de umidade para evitar corrosão.

### 3.1.3 FIO RESISTIVO

O material do fio resistivo deve ser de alta resistividade, feito a partir de ligas metálicas. São utilizadas ligas metálicas dado que metais puros possuem um alto coeficiente de temperatura.

As ligas metálicas típicas utilizadas para resistores de fio são (Resistor Guide, 2014):

- Ligas de Cobre e Níquel;
- Ligas de Níquel e Cromo;
- Ligas de Ferro e Cromo;
- Ligas de Ferro, Cromo e Alumínio.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades de algumas das ligas. É importante considerar que há variações nos nomes das ligas entre fabricantes assim como pequenas variações do percentual dos elementos que compõem a liga. Antes de encomendar o fio resistivo, suas propriedades devem ser verificadas no catálogo do fabricante.

Tabela 1. Propriedades das principais ligas metálicas utilizadas em fios resistivos (Catálogo KANTHAL)

Ligas	Material	Composição (%)	Propriedades		
			Resistividade ( $10^{-6}\Omega$ )	Coeficiente de Temperatura ( $10^{-3}\Omega/^\circ\text{C}$ )	Máxima temperatura de operação ( $^\circ\text{C}$ )
Cobre-Níquel	Constantan (ou <i>Cuprothal</i> )	54Cu - 44Ni - 1Mn	0,49	0,02	400
Níquel-Cromo	Nikrome 80 (ou <i>Nikrothal</i> )	20Cr - 80Ni	1,09	0,17	1200
Ferro-Cromo	CrNiFe	70Ni - 20Cr - 8Fe - 2Mn	1,11	0,9	1100
Ferro-Alumínio-Cromo	Kanthal D	75Fe - 20Cr - 5Al	1,35	0,04	1300

Existem também variações de uma mesma liga, nas quais o percentual dos componentes da liga é variado para criar ligas com diferentes resistividades. Um exemplo é o Nikrothal com 80, 70, 60, 40 e 20% de Níquel.

Para cada liga metálica, são disponibilizadas tabelas pelos fabricantes, nas quais são relacionados vários diâmetros do fio com as respectivas resistências por metro. O valor da resistência é função da resistividade do fio, de sua área transversal e do

comprimento utilizado. A escolha da liga metálica utilizada no projeto será baseada na resistividade do material e no coeficiente de temperatura, para os casos nos quais se deseje precisão no valor da resistência. Para resistores utilizados para aquecimento, o ponto de fusão também deverá ser observado.

### 3.2 RESISTORES A SEREM PROJETADOS - GERADOR DO LAT

O gerador do LAT-UFCG possui cinco tipos de resistores. Além dos resistores de cauda e de frente, existem também os resistores de carga, saída da fonte e de medição. Os dados destes resistores podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Dados dos resistores do gerador de altas tensões impulsivas do LAT.

Resistência	Símbolo	Valor ( $\Omega$ )	Quantidade total	Quantidade danificada	Dados do núcleo	
					Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Cauda	$R_t$	200	7	0	51,5	520
Frente	$R_f$	120	28	3	22	430
Saída da fonte	$R_1$	538.000	1	0	51,0	890
Medição	$R_2$	27.200	1	1	51,0	410
Carga	$R_c$	77.200	6	3	51,3	1075

Alguns dos resistores ilustrados na Tabela 2, estão danificados e deverão ser substituídos a partir deste projeto.

Para um fio resistivo de uma dada liga, quanto menor for o diâmetro do fio, maior será a resistência obtida por comprimento do fio. Portanto, para obter altos valores de resistência, utilizam-se fios com diâmetros pequenos e grandes comprimentos, como no caso dos resistores de saída da fonte, de medição e de carga.

Fios com diâmetros pequenos são mais delicados e tornam os resistores mais frágeis, necessitando de maior cuidado no manuseio, pois um impacto sobre o resistor poderá, mais facilmente, causar uma ruptura do fio, rompendo o contato entre as extremidades do resistor.

### 3.3 ANÁLISE MATEMÁTICA

O valor da resistência é função da resistividade do fio, de sua área transversal e do comprimento do fio utilizado, conforme observado na Equação 14.

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (14)$$

na qual  $\rho$  é a resistividade do fio,  $l$  o comprimento e  $A$  a área da seção transversal.

Os fabricantes fornecem tabelas relacionando vários diâmetros do fio de determinada liga com as respectivas resistências por metro.

O objetivo final do projeto de resistores de fio é determinar o passo necessário para obter a resistência desejada, a partir de dados do núcleo e do fio resistivo. Para projetar os resistores de fio, devem-se ter os seguintes dados iniciais:

- $R$  ( $\Omega$ ): Resistência desejada;
- $d_N$  (mm): Diâmetro do núcleo;
- $l_N$  (mm): Comprimento do núcleo utilizado para o enrolamento;
- $R_{PM}$  ( $\Omega/m$ ): Resistência por metro da liga escolhida;
- $d_F$  (mm): Diâmetro do fio resistivo (ou raio  $R_F$ ), associado à resistência por metro da liga escolhida;
- Tabela de passos disponíveis, do torno utilizado para o enrolamento.

Para calcular o perímetro de uma espira, deve-se considerar o diâmetro do fio utilizado e o diâmetro do tubo, conforme indicado na Figura 10.

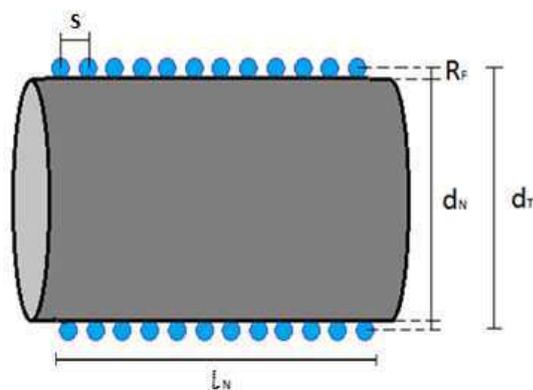


Figura 10. Passo e diâmetro para o enrolamento do fio resistivo no núcleo.

O perímetro (em milímetros) será dado por:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(d_N + 2R_F)}{2} = \pi \cdot (d_N + d_F), \quad (15)$$

$$P = \pi \cdot d_T. \quad (16)$$

Calcula-se também o comprimento do fio ( $l_F$ ) necessário (em metros), o qual pode ser obtido através de:

$$l_F = \frac{R}{R_{PM}}. \quad (17)$$

A partir do comprimento do fio necessário, em metros, e do perímetro, em milímetros, calcula-se o número total de espiras ( $N_E$ ):

$$N_E = \frac{l_F}{P/1000} = \frac{l_F \cdot 1000}{P}. \quad (18)$$

Por fim, calcula-se o passo ( $S$ ) (em milímetros), dado por:

$$S = \frac{l_N}{N_E}. \quad (19)$$

O passo calculado é o passo máximo para a obtenção do valor de resistência desejado, utilizando todo o comprimento do núcleo. Porém, pode-se optar por usar um comprimento menor do núcleo para o enrolamento, bastando para tal, utilizar um passo menor, mantendo o mesmo número de espiras. Quanto menor o passo escolhido, maior o número de espiras por centímetro obtido e, conseqüentemente, menor será o comprimento do núcleo necessário para atingir o valor da resistência desejado.

É importante observar da Figura 10, que há um limite físico na dimensão do menor passo que poderá ser utilizado, o qual corresponde ao diâmetro do fio resistivo. Porém, utilizando o passo mínimo, as espiras estarão lado a lado, isto é, sem espaçamento entre elas. Para considerar um espaço para a aplicação do verniz entre as espiras, o passo mínimo deverá corresponder a um valor ligeiramente superior ao diâmetro do fio resistivo.

Além de modificar o passo utilizado, outra opção de projeto é utilizar outro diâmetro do fio da liga escolhida o qual, por conseguinte, terá outra resistência por metro. Por exemplo, ao utilizar um diâmetro menor, o fio terá uma resistência por metro maior e, conseqüentemente, será necessário utilizar um comprimento menor do fio para obter a resistência desejada, resultando em um número menor de espiras. As espiras podem estar espalhadas ao longo de um comprimento maior do núcleo, ao utilizar um

passo maior, ou podem estar concentradas em um comprimento menor do núcleo, ao optar por um passo menor.

Frequentemente, o torno mecânico utilizado no enrolamento do resistor possui passos específicos, que diferem do passo calculado. Nestes casos, pode-se utilizar o passo disponível mais próximo do calculado e realizar ajustes no projeto. O ajuste consiste em retirar, ou adicionar, espiras, modificando o comprimento do núcleo utilizado, possibilitando a correção do erro introduzido pelo uso de um passo diferente do calculado.

Para realizar o ajuste, inicialmente calcula-se o novo número de espiras por centímetro ( $N'_{EPC}$ ), utilizando o passo disponível ( $S'$ ):

$$N'_{EPC} = \frac{10}{S'} \quad (20)$$

Em seguida, calcula-se o novo número de espiras obtido ( $N'_E$ ):

$$N'_E = \frac{l_N \cdot N'_{EPC}}{10} \quad (21)$$

Compara-se este número de espiras com o número obtido anteriormente, para determinar quantas espiras deverão ser retiradas ou acrescentadas. O número de espiras a ser modificado corresponderá a uma alteração no comprimento no núcleo; aumentando ou diminuindo o comprimento inicialmente estabelecido. O novo comprimento do núcleo  $l'_N$  a ser utilizado para obter a resistência desejada, a partir do novo passo, será dado por:

$$l'_N = l_N + (N_E - N'_E) \cdot S' \quad (22)$$

Caso o novo número de espiras  $N'_E$  seja maior que o inicial  $N_E$ , espiras deverão ser retiradas e o comprimento do núcleo utilizado  $l'_N$  será menor que o inicial  $l_N$ . Caso contrário, o comprimento do núcleo utilizado será maior que o inicial.

Percebe-se, portanto, que o projeto dos resistores dependerá fortemente das escolhas do projetista quanto ao diâmetro do fio que será utilizado, às dimensões do núcleo que serão utilizadas, entre outros. Logo, existem várias combinações possíveis de variáveis para obter o valor de resistência desejado.

### 3.4 PROJETO DOS RESISTORES

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados no projeto dos resistores, assim como os parâmetros calculados, incluindo o passo e o comprimento do fio utilizado.

#### 3.4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Serão apresentados os materiais e métodos escolhidos para o projeto dos resistores, contendo considerações sobre o núcleo, o fio resistivo e o método de enrolamento utilizado para cada resistor.

##### 3.4.1.1 NÚCLEO DO RESISTOR

Em geral as aplicações limitam as dimensões dos resistores, portanto, as dimensões do núcleo são conhecidas e fixadas no início do projeto.

O projeto dos resistores, neste trabalho, será feito utilizando as dimensões dos núcleos de fenolite dos resistores originais do gerador do LAT. O intuito é reutilizar estes núcleos, os quais ainda estão em boas condições.

O comprimento do núcleo utilizado para o projeto não é o comprimento total disponível para o enrolamento, o qual é mostrado na Tabela 2 para cada resistor. Em geral, uma margem é deixada para a realização de modificações no comprimento do núcleo utilizado, em função de possíveis ajustes nos passos. Os comprimentos dos núcleos que serão utilizados neste projeto são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados utilizados para o projeto dos resistores do gerador do LAT

Resistência	Símbolo	Valor ( $\Omega$ )	Dados do núcleo utilizados	
			Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Cauda	$R_t$	200	51,5	510
Frente	$R_f$	120	22	420
Saída da fonte	$R_1$	538.000	51,1	870
Medição	$R_2$	27.200	51,0	405
Carga	$R_c$	77.200	51,3	1060

### 3.4.1.2 LIGAS METÁLICAS DO FIO RESISTIVO

Os resistores de frente e de cauda requerem alta precisão em seu valor, pois afetam diretamente as formas de onda. Para o seu projeto, escolheu-se a liga Constantan, pois fornece alta precisão no valor da resistência, possuindo um coeficiente de temperatura desprezível (vide Tabela 1), além de boa resistência à corrosão atmosférica e facilidade de ser soldada. Estas características fazem com que a liga Constantan seja largamente utilizada para resistores de fio de precisão.

Para o projeto dos resistores de carga, medição e saída da fonte, foram consideradas três possibilidades de ligas para o fio resistivo:

- Constantan;
- Kanthal D;
- Nikrothal.

Além da liga Constantan, cujas vantagens foram descritas acima, considerou-se também a liga Kanthal D por possuir o segundo menor coeficiente de temperatura e a maior resistividade, conforme observado da Tabela 1. Porém, não há disponibilidade de fios da liga Constantan com diâmetros pequenos, no LAT e, de fato, para diâmetros pequenos, estes só podem ser adquiridos através de importação. No LAT também não há estoque da liga Kanthal D, portanto, realizou-se o projeto utilizando a liga Nikrothal 80, por possuir o terceiro menor coeficiente de temperatura e a segunda maior resistividade das ligas consideradas e, principalmente, por estarem disponíveis no LAT estoques de fios de diferentes diâmetros.

Na Figura 11 observa-se a etiqueta informativa de uma das ligas disponíveis no LAT. Percebe-se que o diâmetro não é fornecido diretamente, mas sim através da medida B&S. Deve-se, portanto, realizar a equivalência desta medida com o diâmetro em milímetros. A tabela para realizar esta conversão pode ser vista no Anexo A.

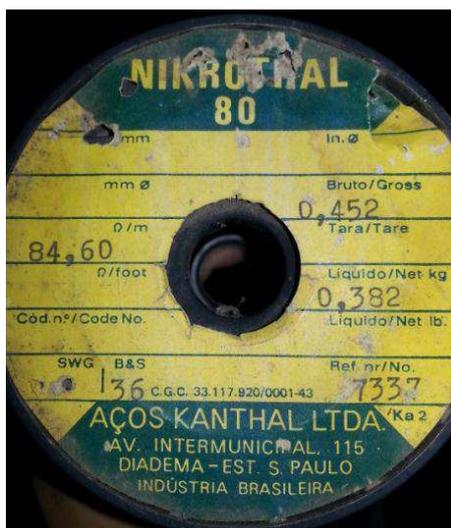


Figura 11. Etiqueta informativa de uma liga Nikrothal presente no LAT.

As ligas que estão atualmente disponíveis no LAT, com as medidas B&S fornecidas e seus respectivos diâmetros equivalentes, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Ligas disponíveis no LAT.

Liga	B&S	Diâmetro (mm)	$\Omega/m$
Nikrothal 60	34	0,16	56,4
Nikrothal 80	36	0,127	85,9
Nikrothal 80	36	0,127	85,1
Nikrothal 80	36	0,127	84,4
Nikrothal 80	36	0,127	84,6
Nikrothal 80	32	0,202	31,7
Nikrothal 80	26	0,405	8,67
Cuprothal	30	0,255	10,3
Cuprothal	30	0,255	10,0

#### 3.4.1.3 MÉTODO DE ENROLAMENTO UTILIZADO

Conforme discutido no Tópico 0, os resistores de frente e de cauda não devem apresentar indutância de modo a reduzir as oscilações na frente de onda e no pico da forma de onda do impulso. Foi apresentado no Tópico 2.3.2 que o método de enrolamento mais vantajoso para reduzir indutâncias e capacitâncias parasitas em resistores de fio, consiste no método de Ayrton-Perry. Portanto, os resistores de frente e de cauda serão projetados utilizando este método de enrolamento.

Os resistores de frente e de cauda terão duas camadas iguais, em paralelo. Portanto, cada camada deve ser projetada com o dobro da resistência final desejada. As espiras das duas camadas de fio estarão intercaladas, e o passo de cada camada deverá

ser no mínimo o dobro do diâmetro do fio resistivo, com um acréscimo de um pequeno espaço para acomodar o verniz entre camadas. Os cálculos dos parâmetros apresentados no Tópico 3.3, também são válidos para o projeto dos resistores que fazem uso do método de enrolamento de Ayrton-Perry, bastando apenas considerar as observações acima, quanto ao número de camadas e ao passo utilizado.

Os resistores de carga, medição e saída da fonte serão projetados utilizando o método comum de enrolamento, com apenas uma camada e um sentido de enrolamento.

### 3.4.2 PROJETO DOS RESISTORES

A partir dos dados da Tabela 3, foram concebidas alternativas de projeto para os resistores. Os parâmetros dos projetos serão apresentados a seguir.

#### 3.4.2.1 RESISTORES SEM INDUTÂNCIA

O projeto dos resistores de frente e de cauda foi realizado utilizando a liga Constantan (Cuprothal), com diâmetro de 0,25 mm e 10,0  $\Omega/m$ , pois esta liga está disponível no LAT. Estes projetos são detalhados a seguir:

##### 3.4.2.1.1 RESISTOR DE FRENTE

Tabela 5. Projeto do Resistor de Frente.

	<b>Definição</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	120	$\Omega$
	Resistência por camada	240	$\Omega$
	Resistência por metro	10	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	420	mm
	Diâmetro do núcleo	22	mm
	Diâmetro do fio	0,25	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	69,9	mm
	Comprimento do fio por camada	24	m
	Comprimento total do fio	42	m
	Número de espiras por camada	343,3	-
	Passo por camada	1,22326	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível por camada	1,20	mm
	Número de espiras por centímetro	8,33	-
	Número de espiras por camada	350	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo por camada	-7,99	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	412	mm

## 3.4.2.1.2 RESISTOR DE CAUDA

Tabela 6. Projeto do Resistor de Cauda.

	<b>Definição</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	200	$\Omega$
	Resistência por camada	400	$\Omega$
	Resistência por metro	10	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	510	mm
	Diâmetro do núcleo	51,5	mm
	Diâmetro do fio	0,25	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	162,58	mm
	Comprimento do fio por camada	40	m
	Comprimento total do fio	80	m
	Número de espiras por camada	246,0	-
	Passo por camada	2,07286	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível por camada	2,00	mm
	Número de espiras por centímetro	5,0	-
	Número de espiras por camada	255	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo por camada	-17,927	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	492,07	mm

### 3.4.2.2 RESISTORES COM ENROLAMENTO EM UMA ÚNICA CAMADA

Para o projeto dos resistores de carga e medição, utilizou-se a liga Nikrothal 80, com  $84,6 \Omega/m$  e diâmetro de  $0,127 \text{ mm}$ , que está disponível no LAT. Para o projeto do resistor de saída da fonte, é necessário um fio resistivo com diâmetro inferior ao daqueles disponíveis no LAT, portanto o projeto foi realizado utilizando um fio da liga Nikrothal 80, com  $338,83 \Omega/m$  e diâmetro de  $0,064 \text{ mm}$ . Alternativas de projeto utilizando a liga Kanthal DS podem ser vistas no Apêndice.

#### 3.4.2.2.1 RESISTOR DE CARGA

Tabela 7. Projeto do Resistor de Carga.

	Definição	Valor	Unidade
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	77.200	$\Omega$
	Resistência por metro	84,6	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	1060	mm
	Diâmetro do núcleo	51,3	mm
	Diâmetro do fio	0,127	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	161,56	mm
	Comprimento total do fio	912,53	m
	Número de espiras total	5648,1	-
	Passo	0,18767	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível	0,18	mm
	Número de espiras por centímetro	55,56	-
	Número de espiras	5888,89	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo	-43,334	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	1016,67	mm

#### 3.4.2.2.2 RESISTOR DE MEDIÇÃO

Tabela 8. Projeto do Resistor de Medição.

	Definição	Valor	Unidade
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	27200	$\Omega$
	Resistência por metro	84,6	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	405	mm
	Diâmetro do núcleo	51,0	mm
	Diâmetro do fio	0,127	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	160,62	mm
	Comprimento total do fio	321,51	m
	Número de espiras total	2001,67	-
	Passo	0,20233	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível	0,20	mm
	Número de espiras por centímetro	50,0	-
	Número de espiras	2025,0	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo	-4,66	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	400,34	mm

## 3.4.2.2.3 RESISTOR DE SAÍDA DA FONTE

Tabela 9. Projeto do Resistor de Saída da Fonte.

	<b>Definição</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	538.000	$\Omega$
	Resistência por metro	338,83	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	870	mm
	Diâmetro do núcleo	51,1	mm
	Diâmetro do fio	0,064	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	160,736	mm
	Comprimento total do fio	1587,839	m
	Número de espiras total	9878,527	-
	Passo	0,08807	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível	0,08	mm
	Número de espiras por centímetro	125,0	-
	Número de espiras	10875	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo	-79,72	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	790,28	mm

## 4 CONSTRUÇÃO DOS RESISTORES

De acordo com os dados apresentados na Tabela 2, é necessária a construção dos resistores de frente, carga e medição, pois estão danificados. Futuramente, caso venha a ser necessária a construção dos demais resistores, pode-se utilizar o projeto realizado neste trabalho.

O processo construtivo adotado consiste das seguintes etapas:

- i. Aplicar uma camada de verniz antes do enrolamento do fio;
- ii. Enrolar o fio resistivo utilizando um torno mecânico ou uma bobinadeira;
- iii. Aplicar uma camada de verniz sobre o enrolamento finalizado;
- iv. Soldar os terminais do fio resistivo nas extremidades do resistor;
- v. Envolver o resistor com cadarço (fita de algodão) e aplicar verniz.

Caso sejam utilizadas duas camadas, repetem-se os passos i, ii e iii, e soldam-se os terminais do fio de modo que as duas camadas estejam em paralelo.

Para a construção dos resistores foi utilizado o torno mecânico da oficina do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE). A tabela de passos disponíveis neste torno pode ser vista no Anexo B.

O arranjo para o enrolamento do resistor é mostrado na Figura 12.



Figura 12. Arranjo para o enrolamento do resistor com o torno do DEE.

No entanto, como o torno da oficina do DEE só comporta resistores de até 52 cm de comprimento, incluindo os terminais, não foi possível enrolar os demais resistores. Para tanto seria necessário um torno mecânico de dimensões maiores.

Entrou-se em contato com o professor responsável pela oficina do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), o qual informou que apesar de possuir um torno com dimensões maiores, este está atualmente inoperante.

Uma alternativa aos recursos existentes na UFCG é a opção de terceirizar o enrolamento dos resistores maiores, enquanto se aguarda o conserto do torno do DEM. Discute-se também a possibilidade da aquisição de uma bobinadeira pelo o LAT.

Assim, apesar de ter projetado os demais resistores, apenas o resistor de frente foi construído no prazo disponível à realização deste trabalho.

## 5 TESTES PARA A VALIDAÇÃO DO PROJETO

Para validação do projeto, foram realizados testes sobre o resistor construído – resistor de frente. Estes testes constaram da medição da resistência, medição da indutância e verificação das características de operação, com o auxílio de um termovisor.

### 5.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA

O teste inicial consistiu em verificar se o valor da resistência corresponde ao esperado. Para medir o valor da resistência, foi utilizado um multímetro na escala de 200  $\Omega$ . Na Figura 13 é mostrado o esquema utilizado para o teste e o resultado obtido.



Figura 13. Medição do valor da resistência para o resistor de frente.

O resistor de frente foi projetado para obter 120  $\Omega$ . Constatou-se, e pode ser observado na Figura 13, que a resistência obtida foi de 122,3  $\Omega$ , correspondente a um erro, aceitável, de 1,9%. O resultado obtido valida o projeto quanto ao valor da resistência.

Parte deste erro é provocada pelo desgaste do torno utilizado no enrolamento. O torno não produziu um enrolamento com passo constante ao longo de todo o resistor, conforme pode ser observado na Figura 14.



Figura 14. Não uniformidade do passo obtido, utilizando o torno do DEE.

## 5.2 MEDIÇÃO DA INDUTÂNCIA

O projeto do resistor de frente foi realizado para minimizar ao máximo a indutância. Para validar o projeto utilizando o método de enrolamento Ayrton-Perry, a indutância foi medida nos terminais do resistor utilizando o LCR Meter 4263B, do fabricante Agilent. Na Figura 15 pode-se ver o resultado obtido.



Figura 15. Medição da indutância do resistor de frente.

Observa-se que o valor da indutância medido foi de 4,373  $\mu\text{H}$ . Resistores de frente são satisfatórios quanto à indutância, quando satisfazem a relação (KUFFEL, et al., 2000 p. 70):

$$\frac{L}{R} < 0,1 \mu\text{s}.. \quad (23)$$

Para o resistor de Frente, obteve-se:

$$\frac{L}{R} = 0,036 \mu s. \quad (24)$$

Portanto, o projeto do resistor foi validado também do ponto de vista do método de enrolamento adotado, visando reduzir a indutância.

### 5.3 VERIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO

As características de operação do resistor foram verificadas com o auxílio de um termovisor. Com um VARIAC, variou-se a tensão sobre o resistor e foram medidos os valores da tensão, corrente e temperatura utilizando o esquema mostrado na Figura 16. O termovisor utilizado foi o modelo ThermoCAM P65, do fabricante FLIR. É importante salientar que a medição desejada da temperatura é aquela na qual a temperatura no resistor se estabilizou.



Figura 16. Verificação da operação do resistor de frente.

Os dados obtidos do experimento são ilustrados na Tabela 10. Uma imagem obtida com o termovisor, quando na aplicação de 50 V sobre o resistor, pode ser vista na Figura 17.

Tabela 10. Tensão, corrente e temperatura medidos sobre o resistor de frente

Tensão (V)	Corrente (A)	Temperatura (°C)
20,2	0,165	35,7
30,5	0,249	46,3
39,8	0,326	57,8
50	0,409	71,3

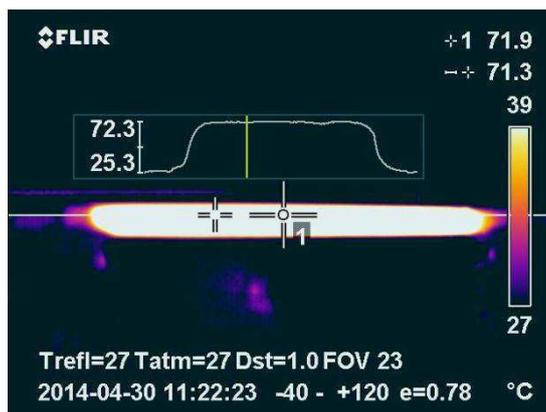


Figura 17. Medição da temperatura com o termovisor, quando aplicada uma tensão de 50 V sobre o resistor de frente.

A partir das medições realizadas, traçou-se o gráfico da potência em função da temperatura, mostrado na Figura 18.

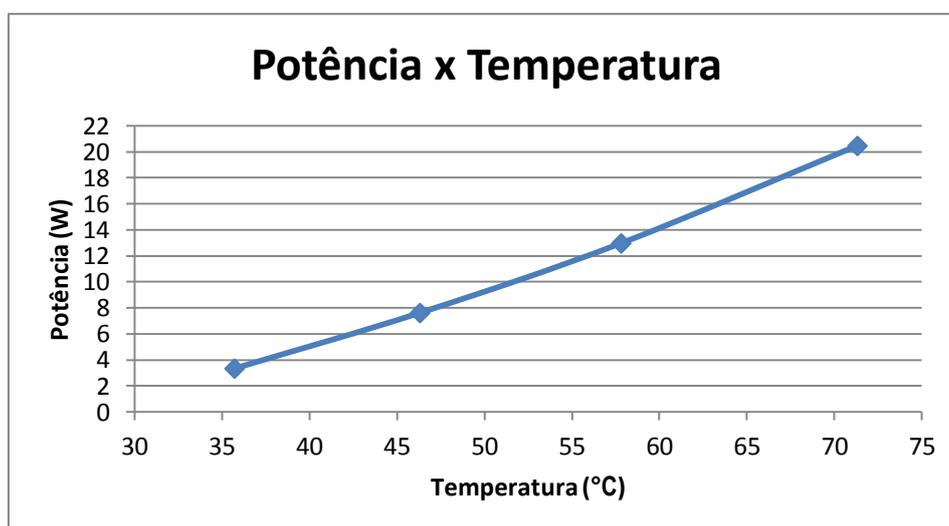


Figura 18. Curva da potência versus temperatura no resistor de frente.

As ligas metálicas possuem elevado ponto de fusão, portanto, serão as características do verniz utilizado que definirão o limite de temperatura e, conseqüentemente, da potência do resistor. O verniz utilizado foi o Lacktherm 1334, da WEG, cujo limite de temperatura é de 130 °C. Verificou-se a potência obtida em função da temperatura. Percebe-se da Figura 18 que para 70°C, correspondente a aproximadamente metade da temperatura limite, a potência obtida foi de 20 W. Vale salientar que embora a potência em resistores de geradores de impulso seja elevada, a energia transformada no descarregamento do capacitor  $C_1$ , dada pela Equação 8, é pequena, devido à curta duração de tempo do impulso.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso objetivou-se realizar o projeto de resistores para o gerador de alta tensão impulsiva de 7 estágios do LAT, a partir do estudo dos tipos de resistores aplicados à alta tensão. O projeto abordou a concepção dos resistores de frente, cauda, medição, saída da fonte e carga, visando substituir os resistores atualmente danificados, e registrar o projeto para a construção dos resistores que venham a ser danificados futuramente.

Observa-se que não existe uma única solução viável para o projeto e, portanto, mais de uma alternativa de projeto foi elaborada considerando a utilização de diferentes ligas metálicas do fio resistivo, tais como Cuprothal, Nikrothal e Kanthal D. Cada liga metálica possui vantagens e desvantagens, apresentadas no decorrer deste trabalho. Os projetos que se mostraram mais viáveis foram aqueles que fazem uso de ligas metálicas atualmente em estoque no LAT. Assim, os resistores de frente e de cauda foram projetados utilizando fio resistivo de Cuprothal. O projeto dos demais resistores, foi realizado utilizando a liga Nikrothal, com diferentes diâmetros.

O resistor de frente foi enrolado utilizando o torno mecânico do DEE. No entanto, constatou-se que a construção dos demais resistores necessitaria de um torno maior. Portanto, apenas o resistor de frente foi construído para a realização de testes. No entanto, os demais resistores foram projetados, restando apenas a realização dos seus enrolamentos.

A partir da experiência adquirida neste trabalho, e na interação realizada com vários setores e departamentos percebe-se a necessidade e a importância da cooperação visando otimizar o uso dos recursos da UFCG. Foi discutida com o professor responsável pelo torno do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), a possibilidade do uso do torno daquele departamento. O professor concordou, mas destacou que atualmente o torno se encontra inoperante devido a um problema mecânico.

Uma vez o resistor construído, foram realizados testes de medição de resistência e indutância e foram verificadas as características de operação do resistor de frente de onda por meio da relação da potência em função da temperatura, medida realizada utilizando o termovisor do LAT.

A partir da análise dos resultados dos testes conclui-se que o projeto do resistor atende satisfatoriamente às especificações para aplicação no gerador de impulsos, para o qual foi projetado.

Como contribuição do trabalho espera-se que este documento seja útil para projetos de resistores de fio, em geral.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6936 - *Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão*. Abril de 1992.

Catálogo KANTHAL- *Resistance heating alloys for electric home appliances*.

DONOVAN, Dave. 2010. Educação e ciência.. Disponível em:  
<[http://www.ehow.com.br/resistor-sobre\\_66412/](http://www.ehow.com.br/resistor-sobre_66412/)>. Acesso em: janeiro de 2014.

HORNER, Larry E. 1981. *Resistor Pulse Handling Capability*. Albuquerque. Sandia National Laboratories, 1981. SAND81-0569.

KIND, Dieter e FESER, Kurt. *High-voltage Test Techniques*. 2ª edição. SBA Publications, 1999.

KUFFEL, E., KUFFEL, J. e ZAENGL, W.S. 2000. *High Voltage Engineering Fundamentals*. 2ª edição. Butterworth-Heinemann, 2000.

LIRA, George. 2014. Notas de aula - Geração e Medição de Tensão Impulsiva. 2014.

MULLER, Sandra. *Práticas de laboratório- Apostila CEUNES*. 2009.

NAIDU, M.S. e KAMARAJU, V. *High Voltage Engineering*. s.l. : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1995.

Resistor Guide. Types of resistors. *Resistor guide.com*. 2014. Disponível em:  
<<http://www.resistorguide.com/tag/carbon-resistor/>>. Acesso em: Fevereiro 2014.

VISHAY BEYSCHLAG. Basics of Linear Fixed Resistors. *Vishay*. Disponível em:  
<<http://www.vishay.com/docs/28771/basics.pdf>. 28771>. Acesso em: Fevereiro 2014.

## APÊNDICE – PROJETOS ALTERNATIVOS

Projetos alternativos para os resistores de Carga, Medição e Saída da fonte, utilizando a liga Kanthal DS.

Os dados iniciais de resistência por metro e diâmetro do fio resistivo foram obtidos do fornecedor *Supersteel* (<http://www.supersteel.com.br/niquel-cromo/produto/fios-e-fitas/cromo-aluminio-ferro/kanthal-ds/>).

PROJETO DO RESISTOR DE CARGA COM KANTHAL DS			
	Definição	Valor	Unidade
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	77.200	$\Omega$
	Resistência por metro	85,24	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	1060	mm
	Diâmetro do núcleo	51,3	mm
	Diâmetro do fio	0,142	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	161,61	mm
	Comprimento total do fio	905,678	m
	Número de espiras total	5604,1	-
	Passo	0,18915	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível	0,17	mm
	Número de espiras por centímetro	58,824	-
	Número de espiras	6235,29	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo	-107,3	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	952,7	mm

PROJETO DO RESISTOR DE MEDIÇÃO COM KANTHAL DS			
	Definição	Valor	Unidade
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	27.200	$\Omega$
	Resistência por metro	85,24	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	405	mm
	Diâmetro do núcleo	51,0	mm
	Diâmetro do fio	0,142	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	160,667	mm
	Comprimento total do fio	319,1	m
	Número de espiras total	1986,09	-
	Passo	0,20392	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível	0,20	mm
	Número de espiras por centímetro	50,0	-
	Número de espiras	2025,0	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo	-7,783	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	397,217	mm

PROJETO DO RESISTOR DE SAÍDA DA FONTE COM KANTHAL DS			
	Definição	Valor	Unidade
<b>Dados iniciais</b>	Resistência	538.000	$\Omega$
	Resistência por metro	340,978	$\Omega/m$
	Comprimento do núcleo	870	mm
	Diâmetro do núcleo	51,1	mm
	Diâmetro do fio	0,071	mm
<b>Parâmetros calculados</b>	Perímetro	160,758	mm
	Comprimento total do fio	1577,815	m
	Número de espiras total	9814,821	-
	Passo	0,08864	mm
<b>Parâmetros ajustados</b>	Passo disponível	0,08	mm
	Número de espiras por centímetro	125,0	-
	Número de espiras	10875	-
	Modificação no espaçamento inicial do núcleo	-84,814	mm
	Comprimento do núcleo utilizado	785,186	mm

## ANEXO A – TABELA DE CONVERSÃO GAUGE/B&S

Gauge no.	AWG or B&S		SWG		Gauge no.	AWG or B&S		SWG	
	mm	in	mm	in		mm	in	mm	in
4-0	11.684	0.4600	10.1600	0.4000	29	0.286	0.01126	0.345	0.0136
3-0	10.404	0.4096	9.4488	0.3720	30	0.255	0.01003	0.315	0.0124
2-0	9.266	0.3648	8.8392	0.3480	31	0.227	0.008928	0.295	0.0116
0	8.252	0.3249	8.2296	0.3240	32	0.202	0.007950	0.274	0.0108
1	7.348	0.2893	7.6200	0.3000	33	0.180	0.007080	0.254	0.0100
2	6.543	0.2576	7.0104	0.2760	34	0.160	0.006305	0.234	0.00920
3	5.827	0.2294	6.4008	0.2520	35	0.143	0.005615	0.213	0.00840
4	5.189	0.2043	5.8928	0.2320	36	0.127	0.005000	0.193	0.00760
5	4.620	0.1819	5.3848	0.2120	37	0.113	0.004453	0.173	0.00680
6	4.115	0.1620	4.8768	0.1920	38	0.101	0.003965	0.152	0.00600
7	3.665	0.1443	4.4704	0.1760	39	0.0897	0.003531	0.132	0.00520
8	3.264	0.1285	4.0640	0.1600	40	0.0799	0.003145	0.122	0.00480
9	2.906	0.1144	3.6576	0.1440	41	0.0711	0.002800	0.112	0.00440
10	2.588	0.1019	3.251	0.1280	42	0.0633	0.002494	0.102	0.00400
11	2.305	0.09074	2.946	0.1160	43	0.0564	0.002221	0.0914	0.00360
12	2.053	0.08081	2.642	0.1040	44	0.0502	0.001978	0.0813	0.00320
13	1.828	0.07196	2.337	0.0920	45	0.0447	0.001761	0.0711	0.00280
14	1.628	0.06408	2.032	0.0800	46	0.0398	0.001568	0.0610	0.00240
15	1.450	0.05707	1.829	0.0720	47	0.0355	0.001397	0.0508	0.00200
16	1.291	0.05082	1.626	0.0640	48	0.0316	0.001244	0.0406	0.00160
17	1.150	0.04526	1.422	0.0560	49	0.0281	0.001108	0.0305	0.00120
18	1.024	0.04030	1.219	0.0480	50	0.0250	0.000986	0.0254	0.00100
19	0.912	0.03589	1.016	0.0400	51	0.0203	0.000800	0.0223	0.000878
20	0.812	0.03196	0.914	0.0360	52	0.0152	0.000600	0.0199	0.000782
21	0.723	0.02846	0.813	0.0320	53	0.0127	0.000500	0.0177	0.000697
22	0.644	0.02535	0.711	0.0280	54	0.0102	0.000400	0.0157	0.000620
23	0.573	0.02257	0.610	0.0240	55	0.0076	0.000300	0.0140	0.000552
24	0.511	0.02010	0.559	0.0220	56			0.0125	0.000492
25	0.455	0.01790	0.508	0.0200	57			0.0111	0.000438
26	0.405	0.01594	0.457	0.0180	58			0.00991	0.000390
27	0.361	0.01420	0.417	0.0164	59			0.00881	0.000347
28	0.321	0.01264	0.376	0.0148	60			0.00785	0.000309

Fonte: Catálogo Kanthal.

## ANEXO B – TABELA DE PASSOS DO TORNO DO DEE

A imagem contida neste anexo, na qual são mostrados os passos disponíveis no torno, foi obtida do torno mecânico da oficina do Departamento de Engenharia Elétrica.

PASSO EM M.M. PINHÃO POSIÇÕES DAS ALAVANCAS			PASSO EM M.M. PINHÃO POSIÇÕES DAS ALAVANCAS			PASSO EM M.M. PINHÃO POSIÇÕES DAS ALAVANCAS		
6,00	48	A	1,75	28	B	0,70	28	B
6,50	44	A	1,50	48	B	0,65	28	B
7,00	40	A	1,40	28	B	0,60	48	B
7,50	36	A	1,30	40	B	0,55	44	B
8,00	32	A	1,20	20	B	0,50	40	B
8,50	28	A	1,10	48	B	0,45	36	B
9,00	24	A	1,00	44	B	0,40	32	B
9,50	20	A	0,90	32	B	0,35	28	B
10,00	16	B	0,80	24	B	0,30	24	B
10,50	12	B	0,75	16	B	0,25	20	B
11,00	8	B	0,70	12	B	0,20	16	B
11,50	6	B	0,65	8	B			
12,00	4	B						

ENG.	ALAV. ESQ.	FIOS POR POLEGADA								
		AVANÇOS LONGITUDINAES EM MM.								
40	A	4	4½	5	5½	5¾	6	6½	7	
		2,17	1,93	1,73	1,58	1,51	1,45	1,33	1,24	
20	A	8	9	10	11	11½	12	13	14	
		1,08	0,96	0,87	0,79	0,75	0,72	0,67	0,62	
20	B	16	18	20	22	23	24	26	28	
		0,54	0,48	0,43	0,39	0,38	0,36	0,33	0,31	
20	C	32	36	40	44	46	48	52	56	
		0,27	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,15	
20	D	64	72	80	88	92	96	104	112	
		0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	
20	E	128	144	160	176	184	192	208	224	
		0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	
		1↓	2↓	3↓	4↓	5↓	6↓	7↓	8↓	

AVANÇOS LONGITUDINAES SÃO O TIPO DOS TRANSVERSAES